МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования

Белорусский государственный аграрный технический университет
Кафедра "Электроснабжение сельского хозяйства"

Расчеты электрооборудования при ремонте

Методическое пособие к практическим занятиям по курсу
"Ремонт электрооборудования"

Минск 2006

Rev. 01.   01 September 2022

Рецензенты:
Сердешнов Анатолий Петрович, Селицкая Оксана Юрьевна.

Расчет электрооборудования при ремонте. Методическое пособие к практическим занятиям по курсу "Ремонт электрооборудования" для студентов специальности 1 – 74 06 05 "Энергетическое обеспечение сельскохозяйственного производства"

Сердешнов А. П., Селицкая О. Ю. – Минск, БГАТУ, 2006 г.

Изложены способы расчета электрооборудования при ремонте.
Содержится необходимый справочный материал.

Введение.

При изучении дисциплины "Эксплуатация и ремонт электрооборудования", Часть I "Ремонт электрооборудования", студенты 3 курса агроэнергетического факультета должны на практических занятиях освоить расчеты обмоток трехфазных асинхронных двигателей и трансформаторов, которые выполняются при ремонте. На это учебным планом выделено 17 часов.

Из них на расчеты обмоток трехфазных асинхронных двигателей при наличии магнитопровода отведено 10 часов. Это время предназначено для изучения следующих вопросов:

1) расчет обмоточных данных и построение обмоток – 3 часа;
2) обмер магнитопровода двигателя и обработка полученных данных – 2 час;
3) расчет оптимального числа витков в обмотке одной фазы и одной секции – 3 часа;
4) расчеты номинальных данных трехфазных асинхронных двигателей после ремонта – 2 часа.

На расчеты обмоток трехфазных трансформаторов отведено 7 часов, которые отведены для изучения следующих тем:

1) обработка данных обмера магнитопровода трансформатора и определение его рациональной магнитной нагрузки – 2 часа;
2) расчет оптимального числа витков обмоток и определение их конструктивных размеров – 4 часа.

Целью практических занятий является освоение методик расчетов трехфазных асинхронных двигателей и трансформаторов, а также закрепление теоретического материала курса.

Раздел I. Методические указания по темам расчетов асинхронного двигателя
Тема 1. ”Обмер магнитопровода электродвигателя и обработка полученных данных”

Цель: Ознакомиться с методикой обмера магнитопровода асинхронного двигателя и изучить подготовку данных, полученных для упрощения расчетов обмотки электрической машины, включающую определение площадей магнитной цепи асинхронного двигателя: полюса в воздушном зазоре $Q\delta$; полюса в зубцовой зоне статора Q_Z, поперечного сечения спинки статора Q_C; площади паза в свету Qп. Первые три площади необходимы для расчета магнитных нагрузок B, последняя площадь – для расчета сечения обмоточного провода.

I – I. Общие теоретические сведения.
1. 1. Обмер магнитопровода.

Расчет обмотки асинхронного двигателя начинают с обмера магнитопровода ремонтируемой машины (рис. 1. 1). Измерения выполняются с помощью линеек, штангенциркулей, угольников и других приспособлений. При этом определяются следующие данные:

D – внутренний диаметр сердечника статора, *мм.*; Da – внешний диаметр сердечника статора, *мм.*; l – полная длина сердечника статора; δ – толщина листов стали, *мм.*; также, устанавливается род изоляции между листами электротехнической стали; Z – число пазов (зубцов), *шт*.

Для определения сечения обмоточного провода требуется знание площади паза. Причем профиль его может быть самой различной конфигурации. Но с помощью осевых линий любой из них легко делится на простые фигуры, и следовательно, площади пазов определить не сложно.

На рис. 1. 2 приведены наиболее употребляемые профили пазов. Каждый для расчёта площади требует своих осевых линий, снятия своих размеров и своих формул расчёта.

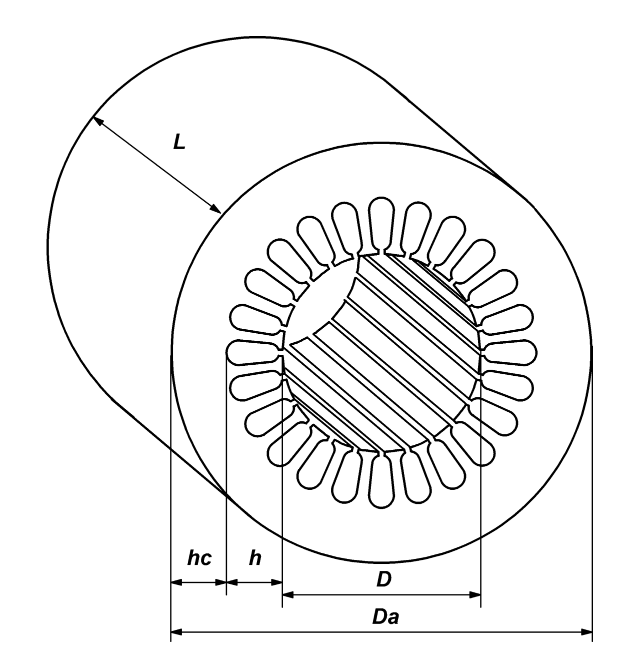


Рис. 1. 1. Магнитопровод асинхронного двигателя

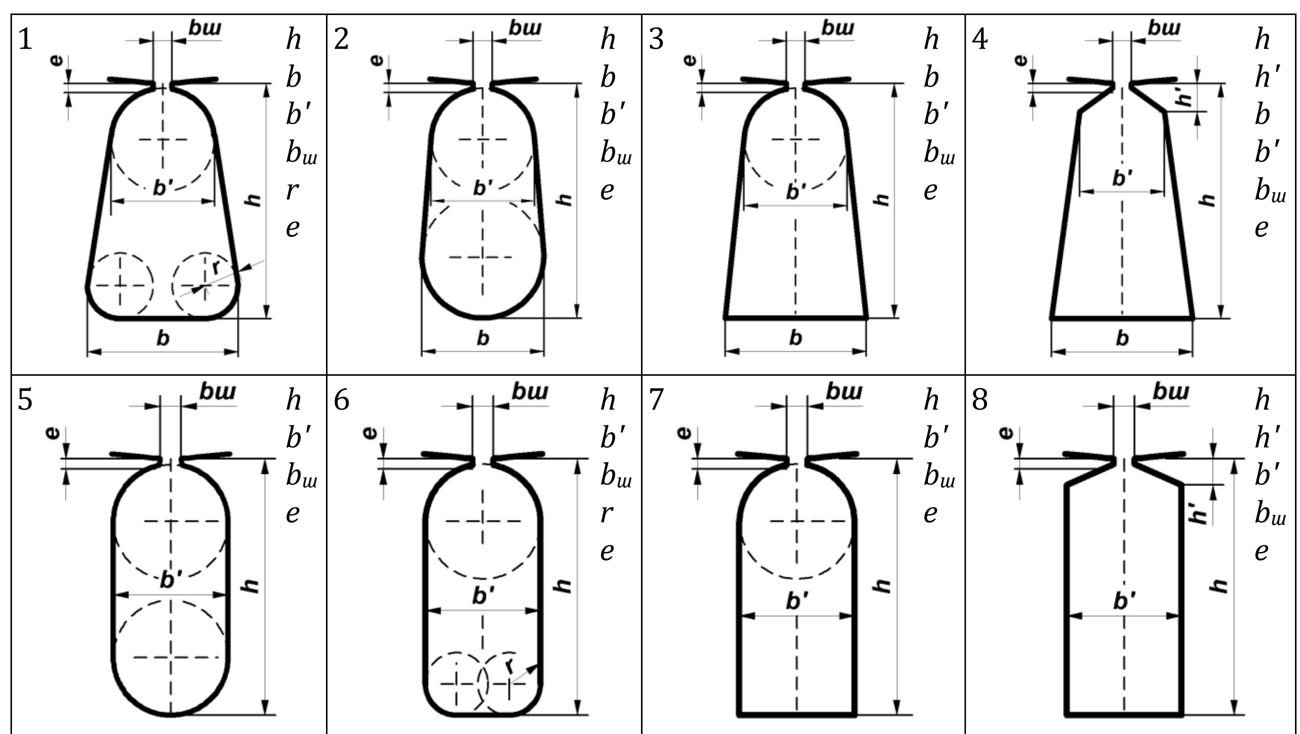


Рис. 1. 2. Наиболее употребляемые профили пазов магнитопроводов асинхронных двигателей.

где: b – большой размер ширины паза, *мм.*; b' – меньший размер ширины паза, *мм.*; bш– ширина шлица паза, *мм.*; h – полная высота паза, *мм.*; e – высота усика паза, *мм.*; r – радиус закругления углов, *мм.*; h' – высота трапеции. В профилях 5 – 8 размеры b и b' равны ($b = b'$). Например, профиль паза 1 (рис. 1. 2) осевыми линиями разделяется на площади следующих фигур: полуокружности с диаметром b', трапеции с основаниями b и b', прямоугольника с шириной r и длиной ($b - 2 \times r$), двух четвертей окружности с радиусом r. Вместе с размерами магнитопровода асинхронного двигателя для расчета обмотки необходимо знание технических условий потребителя (заказчика), в которые входят: n – частота вращения магнитного поля статора, *мин* $^{-1}$; $U_Ф$ – фазное напряжение обмотки статора, *в*; f – частота тока, *гц*; △/Y – схема соединения фазных обмоток (звезда/треугольник).

В целях упрощения выполнения расчетов обмотки асинхронного двигателя проводится обработка полученных выше результатов измерений.

1. 2. Подготовка данных обмера магнитопровода

1. 2. 1. Площадь полюса в воздушном зазоре. В воздушном зазоре сопротивление магнитному потоку по всей площади равномерное. Поэтому, $м^2$

$$Q\delta = \tau \times lp \quad (1.1)$$

где τ – полюсное деление (ширина полюса в воздушном зазоре), *м.*:

$$\tau = \frac{\pi \times D}{2 \times p} \quad (1.2)$$

где p – количество пар полюсов, *шт.*:

$$p = \frac{60 \times f}{n} \quad (1.3)$$

где f – частота сети, n – количество оборотов.
lp – расчётная длина сердечника статора (без поперечных каналов для его охлаждения):

$$lp = l - l\text{к} \times n\text{к} \quad (1.4)$$

где l – полная длина магнитопровода, *м*; lк и nк – соответственно, ширина поперечных каналов (*м*) и их число; естественно, если каналов нет $lp = l$.

1. 2. 2. Площадь полюса в зубцовой зоне статора. В зубцовой зоне статора магнитный поток протекает только по листам электротехнической стали, так как ее магнитная проницаемость μ намного больше, чем изоляции (соответственно: сталь 5 – 15 тыс., изоляция ~ 1). Следовательно, длина магнитопровода l, а значит и площадь полюса Q_Z, сократятся (на площадь занимаемую изоляцией). Отсюда Q_Z будет равна произведению активной площади зубца на их количество в полюсе, $м^2$:

$$Q_Z = Q_{1Z} \times N_Z \quad (1.5)$$

где Q_{1Z} – площадь одного зубца, $м^2$; N_Z – количество зубцов под полюсом, *шт*.

$$Q_{1Z} = la \times b_Z \quad (1.6)$$

где la – активная длина магнитопровода (без изоляции листов), *м.*, b_Z – расчетная средняя ширина зубца, *м;*

$$la = K_C \times lp \quad (1.7)$$

где $Кс$ – коэффициент, учитывающий заполнение пакета магнитопровода сталью, зависящий от рода изоляции и толщины листов стали, табл. 1.1.
Средняя ширина зубца определяется из выражения, *м*.

$$b_Z = \frac{1}{3} \times (2 \times b'_Z + b''_Z) \quad (1.8)$$

где: b'_Z и b''_Z – ширина зубца.

Где находится узкое (b'_Z) и где широкое (b''_Z) место у зуба профиля (рис. 1. 3), зависит от размеров магнитопровода и формы паза, поэтому вначале находятся размеры зуба у расточки статора b', а затем у его основания b''.

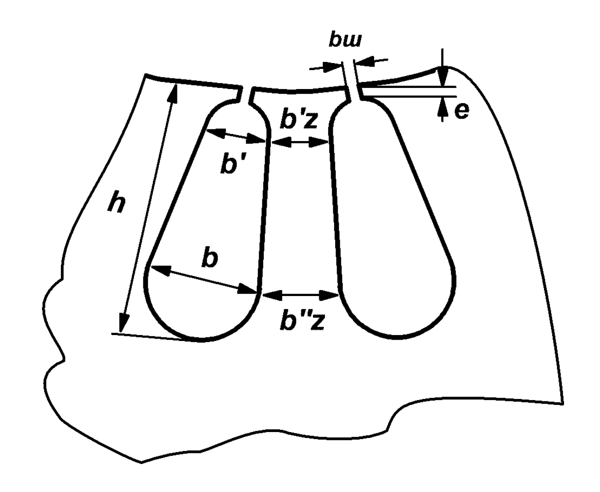


Рис. 1. 3. Эскиз зубца магнитопровода асинхронного двигателя.

Ширина зуба у расточки, *м*.:

$$b_Z' = \frac{\pi \times (D + 2 \times e + b')}{Z} - b' \quad (1.9)$$

Ширина зуба у основания, *м*:

$$b_Z'' = \frac{\pi \times (D + 2 \times h - b)}{Z} - b \quad (1.10)$$

По полученным значениям величин b' и b'' находятся: ширина зубца в узком месте b_Z' и в широком – b_Z''. Количество зубцов под полюсом определяется из выражения, шт.:

$$N_Z = \frac{Z}{2p} \quad (1.11)$$

Таблица 1.

Коэффициенты заполнения стали магнитопровода.

толщина листов стали, δ *мм.*	K_C при роде изоляции	
	лак	оксидное покрытие
0,5	0,93	0,95
0,35	0,9	0,93

1. 2. 3. Площадь магнитопровода в спинке статора. Площадь спинки статора, перпендикулярная магнитному потоку Φ, равна произведению ее высоты hc на активную длину магнитопровода la, $м^2$:

$$Q_C = hc \times la \quad (1.12)$$

где

$$hc = \frac{Da - (D + 2 \times h)}{2} \quad (1.13)$$

1. 2. 4. Площадь паза в свету. Площадь паза в свету требуется при расчете сечения обмоточного провода. В зависимости от профиля пазов магнитопроводов, приведённых на рис. 1. 2, после разбивки их площадей осевыми линиями на простые фигуры (по выше приведённому примеру) для определения указанных площадей можно воспользоваться следующими выражениями, $мм^2$:

Профиль 1.

$$Q\text{п} = Qb' + Q_{\text{Т}} + Q_{\text{ПР}} + Qr \quad (1.14)$$

где Qb' – площадь полуокружности с диаметром b', который равен меньшему размеру ширины паза, *мм*^{2}.

$$Qb' = \frac{\pi \times (b')^2}{8} \quad (1.15)$$

$Q_{\text{Т}}$ – площадь трапеции, *мм*^{2}; с основаниями b и b' и высотой $h_{\text{Т}}$, *мм*.:

$$h_{\text{Г}} = h - e - \frac{b'}{2} \quad (1.16)$$

тогда

$$Q_{\text{Т}} = \frac{b' + b}{2} \times h_{\text{Т}} \quad (1.17)$$

$Q_{\text{ПР}}$ – площадь прямоугольника, *мм*^{2}:

$$Q_{\text{ПР}} = (b - 2 \times r) \times r \quad (1.18)$$

Q – площадь четвертей окружностей, закругления паза на углах с радиусами r, *мм*^{2}:

$$Qr = \frac{\pi \times r^2}{4} \quad (1.19)$$

Окончательно для профиля 1 формула площади паза в свету имеет вид, *мм*^{2}:

$$Q_{\text{П}} = \frac{\pi \times (b')^2}{8} + \frac{b' + b}{2} \times h_{\text{Т}} + (b - 2 \times r) \times r + 2 \times \frac{\pi \times r^2}{4} \quad (1.20)$$

Аналогично получены формулы площадей пазов для остальных профилей пазов рис. 1. 2, в *мм*^{2}. Профили от 2 до 8 имеют следующие виды выражений:

профиль 2:

$$Q\text{п} = \frac{\pi \times b'^2}{8} + \frac{b' + b}{2} \times h\text{т} + \frac{\pi \times b^2}{8} \quad (1.21)$$

hт – высота трапеции, *мм*.:

$$h\text{т} = h - e - \frac{b}{2} - \frac{b'}{2} \quad (1.22)$$

профиль 3:

$$Q\text{п} = \frac{\pi \times b'^2}{8} + \frac{b' + b}{2} \times h\text{т} \quad (1.23)$$

hт – высота трапеции, *мм*.:

$$h\text{т} = h - e - \frac{b'}{2} \quad (1.24)$$

Профиль 4:

$$Q\text{п} = \frac{(b\text{ш} + b')}{2} \times h' + \frac{b' + b}{2} \times (h - e - h') \quad (1.25)$$

Профиль 5:

$$Q\text{п} = \frac{\pi \times (b')^2}{8} + b' \times \left(h - e - 2 \times \frac{b'}{2}\right) + \frac{\pi \times (b')^2}{8} \quad (1.26)$$

Профиль 6:

$$Q\text{п} = \frac{\pi \times b'^2}{8} + b' \times \left(h - e - \frac{b'}{2} - r\right) + r \times (b' - 2 \times r) + 2 \times \frac{\pi \times r^2}{4} \quad (1.27)$$

Профиль 7:

$$Q\text{п} = \frac{\pi \times b'^2}{8} + b' \times \left(h - e - \frac{b'}{2}\right) \quad (1.28)$$

Профиль 8:

$$Q\text{п} = \frac{(b\text{ш} + b')}{2} \times h' + b' \times (h - e - h') \quad (1.29)$$

I – II. Практическое использование теории в расчетах.
Задача №1. Определить площади магнитной цепи, рис.1. 1 и паза магнитопровода трёхфазного асинхронного двигателя, рис.1. 2, профиль 2.

Данные обмера магнитопровода и паза сведены в таблицу, все размеры в *мм.*.

№ варианта	D	Da	l	Z	b	b'	$bш$	h	e	δ	род изоляции
	110	181	125	24	12,6	10,5	3,5	15,1	0,5	0,35	лак

Технические условия заказчика следующие:

n, *мин*$^{-1}$	$U_Ф$, *в*	f, *гц*	схема соединения обмоток
3000	220	50	Y/△

Примечание: Здесь и далее в задании приводятся данные только необходимые для решения задачи.

Решение. 1. Определяем площадь полюса в воздушном зазоре $Q\delta$. Для этого находим:
1. 1 Количество пар полюсов (1. 3):

$$p = \frac{60 \times f}{n} = \frac{60 \times 50}{3000} = 1 \qquad (1.3)$$

Следовательно, количество полюсов будет 2×p = 2×1 = 2 *шт*.
1. 2. Полюсное деление (ширину полюса в воздушном зазоре по 1. 2):

$$\tau = \frac{\pi \times D}{2 \times p} = \frac{3{,}14 \times 0{,}11}{2} = 0{,}173 \text{ м.}$$

1. 3. Расчетную длину сердечника статора (т. к. поперечные каналы для охлаждения магнитопровода отсутствуют):

$$lp = l = 0{,}125 \text{ м.}$$

1. 4. Площадь полюса в воздушном зазоре (1. 1):

$$Q\delta = \tau \times lp = 0{,}173 \times 0{,}125 = 0{,}0216 \text{ м}^2$$

2. Определяем площадь полюса в зубцовой зоне Q_Z. Для этого находим:
2. 1. Активную длину магнитопровода. В таблице 1 находим, что при δ = 0,35 *мм*. и лаковой изоляции между листами электротехнической стали K_C = 0,9, тогда (1. 7):

$$la = K_C \times lp = 0{,}9 \times 0{,}125 = 0{,}1125 \text{ м.}$$

2. 2. Ширину зуба у расточки сердечника АД (1. 9), рис. 1. 3:

$$b'_Z = \frac{\pi \times (D + 2 \times e + b')}{Z} - b' = \frac{3{,}14 \times (0{,}11 + 2 \times 0{,}0005 + 0{,}0105)}{24} - 0{,}0105 = 0{,}0054 \text{ м.}$$

2. 3. Ширину зуба у основания сердечника АД (1. 10):

$$b'_Z = \frac{\pi \times (D + 2 \times h - b)}{Z} - b = \frac{3{,}14 \times (0{,}11 + 2 \times 0{,}0151 - 0{,}0126)}{24} - 0{,}0126 = 0{,}0041 \text{ м.}$$

2. 4. Среднюю ширину зуба. Из выполненных расчетов зуба следует, что узкое его место будет у основания, а широкое у расточки магнитопровода АД. Отсюда $b'_Z = b_Z''$ и $b''_Z = b_Z'$. Тогда (1. 8):

$$bz = \frac{1}{3} \times (2 \times b'z + b''z) = \frac{1}{3} \times (2 \times 0{,}0041 + 0{,}0054) = 0{,}0045 \text{ м.}$$

2. 5. Площадь одного зуба магнитопровода (1. 6):

$$Q_{1Z} = la \times bz = 0{,}1125 \times 0{,}0045 = 0{,}00051 \text{ м}^2$$

2. 6. Количество зубцов под одним полюсом:

$$Nz = \frac{Z}{2p} - \frac{24}{2 \times 1} = 12$$

2. 7. Площадь полюса в зубцовой зоне (1. 5):

$$Qz = Q_{1Z} \times Nz = 0{,}00051 \times 12 = 0{,}0061 \text{ м}^2$$

3. Определяем площадь магнитопровода в спинке статора для этого находим:
3. 1. Высоту спинки статора (1. 13) (рис. 1. 1):

$$hc = \frac{D\text{a} - (D + 2 \times h)}{2} = \frac{0{,}191 - (0{,}11 + 2 \times 0{,}0151)}{2} = 0{,}0254 \text{ м.}$$

3. 2. Площадь в спинке статора (1. 12):

$$Qc = hc \times la = 0{,}0254 \times 0{,}1125 = 0{,}0029 \text{ м}^2$$

4. Вычисляем площадь паза магнитопровода в свету Qп для профиля 2 (рис. 1. 2). Для этого сложную форму паза разделяем осевыми линиями на простые фигуры (две полуокружности и трапеции), отсюда находим:
4. 1. Площадь полуокружности с диаметром b':

$$Qb' = \frac{\pi \times b'^2}{8} = \frac{3{,}14 \times 10{,}5^2}{8} = 43{,}27 \text{ мм}^2$$

4. 2. Высоту трапеции:

$$h\text{т} = h - e - \frac{b}{2} - \frac{b'}{2} = 15{,}1 - 0{,}5 - \frac{12{,}6}{2} - \frac{10{,}5}{2} = 3{,}05 \text{ мм.}$$

4. 3. Площадь трапеции:

$$Q_\text{Т} = \frac{b' + b}{2} \times h\text{т} = \frac{12{,}6 + 10{,}5}{2} \times 3{,}05 = 35{,}22 \text{ мм}^2$$

4. 4. Площадь полуокружности с диаметром b:

$$Qb' = \frac{\pi \times b^2}{8} = \frac{3{,}14 \times 12{,}6^2}{8} = 62{,}3 \text{ мм}^2$$

4. 5. Площадь паза в свету (1. 21):

$$Q\text{п} = Q_{\text{Т}} + Qb' + Qb = 43{,}27 + 35{,}22 + 62{,}3 = 140{,}79 \text{ мм}^2$$

В заключение проведенных расчетов площадей магнитной цепи полезно провести анализ полученных результатов путем их сопоставления. Характерно, что величина площади полюса в зубцовой зоне должна составлять где–то около половины ее площади в воздушном зазоре. И еще, в случае, если частота вращения, заданная заказчиком, соответствует частоте вращения поля статора, на которую изначально был рассчитан асинхронный двигатель, площадь полюса в зубцовой зоне резко не отличается от двойной величины площади в спинке статора.

I – III. Индивидуальные задания к практической задаче № 1.

Приложение 1. Таблица 1. 1.

Данные для решения практической задачи № 1 (пункты №№1. 2. 1, 1. 2. 2, 1. 2. 3)

вариант	D	Da	l	h	Z	δ	род изоляции	n, *мин*$^{-1}$	U_{Φ}, *в*
1	194	349	200	28.2	24	0,35	лак	1500	380
2	126	191	125	14,3	36	0,5	лак	1500	127
3	232	437	200	32,3	48	0,5	оксидная пленка	1500	380
4	84	149	100	12,6	24	0,35	без изоляции	3000	127
5	145	225	115	17,8	36	0,5	оксидная пленка	1500	380
6	232	437	230	32,3	48	0,35	лак	1500	127
7	95	168	100	14,1	24	0,35	без изоляции	1500	380
8	145	225	160	17,8	36	0,5	оксидная пленка	3000	127
9	185	272	140	20,5	48	0,35	оксидная пленка	1500	380
10	95	168	130	14,1	24	0,5	лак	750	127
11	84	131	78	12,1	36	0,35	без изоляции	1500	380
12	185	272	180	20,5	48	0,5	оксидная пленка	750	127
13	НО	191	125	15,1	24	0,5	лак	3000	380
14	84	131	98	12,1	36	0,35	оксидная пленка	1500	127
15	197	272	145	19,1	48	0,35	оксидная пленка	3000	380
16	130	225	130	16,5	24	0,5	лак	3000	127
17	88	131	78	13,0	36	0,35	без изоляции	3000	380
18	197	272	200	19,1	48	0,35	оксидная пленка	1500	127
19	54	100	50	9,0	24	0,5	оксидная пленка	3000	380
20	95	149	100	12,9	36	0,35	лак	3000	127
21	54	100	56	9,0	24	0,5	лак	1500	380
22	100	149	110	13,8	36	0,5	оксидная пленка	3000	127
23	61	100	56	10,4	24	0,5	оксидная пленка	3000	380
24	105	168	100	15,8	36	0,5	без изоляции	3000	127
25	54	100	65	9,0	24	0,5	лак	1500	380

Все размеры в *мм*. Все примеры на f = 50 *гц*.

D – внутренний диаметр магнитопровода, *мм.*; *Da* – наружный диаметр магнитопровода, *мм.*; *l* – длина магнитопровода, *мм.*; *Z* – число зубцов магнитопровода; δ – толщина листов стали, *мм.*; *n* – частота вращения магнитного поля статора, *мин*$^{-1}$; $U_Ф$ – фазное напряжение, *в.*

Таблица 1. 2. Данные для решения практической задачи № 1 (пункт № 1. 2. 4.)

вариант	форма паза (рис. 1. 2)	размеры паза, *мм.*						
		h	*h'*	*b*	*b'*	*b*ш	*e*	*r*
1	1	12,1	–	6,0	4,8	2,5	0,5	3,0
2	2	19,1	–	9,2	6,8	3,7	1,0	–
3	3	13,0	–	7,3	5,2	2,0	0,5	–
4	4	17,5	1,8	6,3	4,5	3,0	0,5	–
5	5	20,5	–	–	7,3	3,7	1,0	–
6	6	14Д	–	11,3	9,1	3,5	0,5	3,1
7	7	12,2	–	–	3,9	2,0	0,5	–
8	8	14,3	2,0	–	6,5	3,5	0,5	–
9	1	8,0	–	5,8	4,5	1,8	0,5	1,4
10	2	20,5	–	9,9	7,3	3,7	1,0	–
И	3	10,2	–	6,0	4,4	2,5	0,5	–
12	4	28,2	4,0	14,9	10,5	4,0	1,0	–
13	5	9,0	–	–	4,8	1,8	0,5	–
14	6	12,9	–	–	4,8	2,5	0,5	2,7
15	7	15,4	–	–	5,4	3,0	0,5	–
16	8	13,0	3,4	–	4,3	2,5	0,5	–
17	1	10,9	–	4,9	3,5	1,8	0,5	1,5
18	2	24,5	–	12,3	9,4	3,7	1,0	–
19	3	32,3	–	12,7	8,7	4,0	1,0	–
20	4	24,0	3,6	11,0	8,2	3,7	1,0	–
21	5	15,8	–	–	4,9	3,0	0,5	–
22	6	16,0	–	–	4,8	3,5	0,9	3,2
23	7	18,8	–	–	6,1	3,7	1,0	–
24	8	9,3	2,0	–	5,9	2,0	0,5	–
25	1	29,2	–	15,0	10,5	4,0	1,0	4,2

Тема 2.
Расчет обмоточных данных и построение обмоток.

II – I. Общие теоретические сведения.

Полная обмотка трехфазного асинхронного двигателя выполняется из витков обмоточного провода, т. е. проводника покрытого тонкой изоляцией с высокой электрической прочностью, которые размещаются в пазах магнитопровода машины для получения вращающегося магнитного поля.
В свою очередь, она состоит из 3–х совершенно одинаковых обмоток со своими началами и концами, обозначаемыми в соответствии с ГОСТ С1–С4; С2–С5; С3–С6. Они отличающихся только тем, что по ним протекают токи, смещенные во времени (или иначе по фазе) на одну треть периода (т. е. при частоте 50 *гц* – на 1/50 сек). В электротехнике фазы принято обозначать буквами А, В, С и составляющие три обмотки называют фазными обмотками. Каждый виток – проводник, имеющий соответствующую форму, состоит из 2–х активных сторон, это те части витка, которые уложены в пазы и 2–х лобовых частей соединяющих активные проводники.

Активными проводники в пазу называются потому, что именно в них магнитные силовые линии потока *Ф* при пересечении индуктируют *эдс* (в отличие от лобовых). Витки, связанные общей осью принято называть катушкой, а если эта катушка принадлежит одной фазе в одной паре полюсов, то фазной катушкой. При числе пазов на полюс и фазу более единицы ($q > 1$) фазная катушка делится на части (катушки с меньшим числом витков). В переводе латыни секция – означает часть. Отсюда секция – катушка из обмоточного провода, является частью катушечной группы. Она, как и виток состоит из 2–х активных и 2–х лобовых частей. Секция может состоять из одного витка, но в общем случае число витков в ней определяется специальным расчетом.
Фазную катушку при $q > 1$ чаще называют катушечной группой или полюсной группой, так как она в этом случае состоит из 2–х или более последовательно соединенных катушек (секций), которые укладываются в рядом лежащие пазы магнитопровода. Соединенные соответствующим образом (последовательно, параллельно или комбинированно) фазные катушки одной и той же фазы образуют фазную обмотку.
Полюсом в общем случае называют сечение, через которое магнитный поток переходит из одной среды в другую. Причем если магнитные силовые линии выходят из полюса его принято называть северным *N*, если входят – южным *S*. Полюсом в асинхронной машине, так как он в ней является бегущим (вращающимся), называют часть пространства расточки статора охватывающего рядом лежащие пазы магнитопровода с одинаковым направлением тока в активных проводниках (независимо от фазности катушек).
В создании каждого полюса принимают участие все три фазы тока, следовательно, в каждом полюсе должны быть их 3–й фазные катушки. В заключение, из всего сказанного следует, что изготовление обмотки трехфазного асинхронного двигателя проходит путь: проводник – виток – секция – фазная катушка (катушечная группа) – фазная обмотка – полная обмотка трехфазного асинхронного двигателя

2. 1. Выбор типа обмотки.

Выбор делается исходя из:
– экономической целесообразности;
– минимального расхода обмоточного провода;
– номинальных мощности и напряжения; – формы паза;
– достоинств и недостатков рассматриваемых обмоток;
– технической возможности выполнения обмотки.
Схемы статорных обмоток трехфазных электрических машин разделяют по:
– числу активных сторон секций в пазу на: однослойные (у которых активная сторона одной и той же катушки занимает весь паз) и двухслойные (активная сторона занимает половину паза);
– размеру шага на: обмотки с полным шагом (при $y = y'$) и с укороченным шагом (при $y < y'$);
– частоте вращения магнитного поля статора на: односкоростные и многоскоростные;
– числу секций в катушечных группах (фазных катушек) на: обмотки с одинаковым числом секций в группе (q = целому числу) и разным (q = дробному числу). По способу выполнения (укладки), обмотки разделяют на:
– шаблонно–рассыпные (или всыпные) они же называются и обмотками с мягкими секциями. У таких обмоток секции укладываются по одному проводнику через прорезь (шлиц) полузакрытого паза. Применяются для машин малой и средней мощности с Uн до 500 *в*;
– протяжные, выполняются протяжкой провода через пазы с торца. Используются для машин напряжением до 10000 *в* при закрытых или полузакрытых пазах.

Способ укладки обмоток трудоемок. В настоящее время используются в основном при ремонте следующие типы обмоток:

– обмотки с жесткими секциями, готовые, изолированные секции, несущие на активных частях пазовую изоляцию, укладываются в открытые пазы. Используются для машин средней и большой мощности с напряжением до 10000 *в* (и даже более).

По способу размещения секций катушечных групп в расточке статора, а также размещения лобовых частей подразделяются на:

– концентрические, с размещением секций (катушек) одна внутри другой и расположением лобовых частей в двух или трех плоскостях. Такие обмотки выполняются обычно вразвалку;

– шаблонные, с одинаковыми секциями катушечных групп. Они могут выполняться и простыми и вразвалку. Если в шаблонной однослойной обмотке "в развалку" выполнить не по полугруппам, а по отдельным катушкам, получим схему цепной обмотки.

Однослойные обмотки, главным образом, выполняются петлевыми, простыми шаблонными, шаблонными "в развалку", цепными, концентрическими. Основные достоинства однослойной обмотки по сравнению с двухслойной:

1. Отсутствие межслоевой изоляции, что повышает коэффициент заполнения паза, а, следовательно, ток и мощность двигателя.
2. Простота изготовления.
3. Большая возможность применения автоматизации при укладке обмоток.

Основные недостатки однослойной обмотки:

1. Повышенный расход проводникового материала.
2. Сложность укорочения шага, а следовательно, компенсации высших гармоник магнитного потока.
3. Ограниченные возможности построения обмоток с дробным числом пазов на полюс и фазу.
4. Более трудоемкое изготовление и монтаж катушек для крупных электродвигателей высокого напряжения.

Двухслойные обмотки в основном выполняются с одинаковыми секциями, петлевые, цепные, реже делаются концентрические. Основные достоинства двухслойной обмотки по сравнению с однослойной:

1. Возможность любого укорочения шага, что позволяет:
а) снизить расход обмоточного провода за счет уменьшения длины
лобовой части секций; б) уменьшить высшие гармонические составляющие магнитного потока, т. е. снизить потери в магнитопроводе двигателя.
2. Простота технологического процесса изготовления катушек (многие операции можно механизировать).
3. Возможность выполнения обмотки почти с любой дробностью q, что обеспечивает изготовление обмотки при ремонте асинхронных двигателей с изменением частоты вращения ротора. Кроме того, это является одним из способов приближения формы поля к синусоиде.
4. Возможность образования большего числа параллельных ветвей.

Основные недостатки двухслойной обмотки:

1. Меньший коэффициент заполнения паза (вследствие наличия межслоевой изоляции).
2. Некоторая сложность при укладке последних секций обмотки.
3. Необходимость поднимать целый шаг обмотки при повреждении нижней стороны секции. По приведенным соображениям, в настоящее время в ремонтной практике машин переменного тока двухслойные обмотки получили наибольшее применение. Они дают возможность (особенно при укороченном шаге) сократить до минимума, по сравнению с другими типами обмоток, расход обмоточного провода на единицу мощности АД.

Двухслойной обмотки обладают такими существенными достоинствами, как простота технологии изготовления, высокая степень компенсации гармонических составляющих магнитного потока и пр. К сказанному следует добавить, что двухслойные обмотки без укорочения шага практически не делаются.

2. 2. Расчет обмоточных данных.

Любой тип обмотки трехфазной машины переменного тока характеризуется следующими обмоточными данными:

- N – число катушечных групп
- y – шаг обмотки
- q – число пазов на полюс и фазу (равно числу секций в катушечной группе)
- α – число электрических градусов, приходящихся на один паз
- a – число параллельных ветвей

2. 2. 1. Число катушечных групп. Так как в витке ток в активных проводниках направлен встречно, каждая фазная катушка обмотки участвует в создании пары полюсов. Следовательно, между числом катушечных групп и числом пар полюсов имеется жесткая связь и для однослойной обмотки равно:

$$N_{1\Phi}^{(1)} = p \quad (2.1)$$

где $N^{(1)}{}_{1\Phi}$ число катушечных групп в одной фазе однослойной обмотки, шт. А так как каждую пару полюсов создают все три фазы переменного тока, следовательно, число катушечных групп обмотки асинхронного двигателя естественно увеличивается в m раз:

$$N_{3\Phi}^{(1)} = p \times m \quad (2.2)$$

В двухслойных обмотках число катушечных групп механически увеличивается в два раза (фазные катушки однослойной обмотки по всем секциям разделяют пополам), поэтому в каждой секции число витков будет в два раза меньше, число же катушечных групп в два раза больше, следовательно, оно равно, шт.:

$$N_{1\Phi}^{(2)} = 2 \times p \quad (2.3)$$

На три фазы (m = 3):

$$N_{3\Phi}^{(2)} = 2 \times p \times m \quad (2.4)$$

2. 2. 2. Шаг обмотки (y). Ток, протекающий по виткам катушки, внутрь которой вставлен ферромагнитный стержень, создает в нем магнитный поток. В магнитопроводе АД секции (катушки) уложены в пазы, охватывающие стальные зубцы, поэтому текущий в них ток в воздушном зазоре создает полюс. Следовательно, активные стороны секций смещены в расточке статора на расстояние полюса. Отсюда, шаг обмотки y – это расстояние, выраженное в зубцах (или пазах), между активными сторонами одной и той же секции, он определяется по формуле:

$$y' = \frac{Z}{2p} \pm \varepsilon \quad (2.5)$$

где y' – расчетный шаг (равен полюсному делению, выраженному в пазах); ε – произвольное число меньше 1, доводящее расчетный шаг y' до целого значения.

Если между активными сторонами секции помещается полюс, такой шаг y называется полным или диаметральным, если же он меньше размера полюсного деления $y < y'$, его называют укороченным. На практике принято шаг определять в пазах, поэтому при раскладке вторая сторона секции ложиться в паз $y + 1$.

2. 2. 3. Число пазов на полюс и фазу (q). Находится для того, чтобы определить число секций в катушечной группе. Действительно, если в полюсе на одну фазу приходится более одного паза, витки фазной сосредоточенной катушки разделяют на такое количество секций, которое равно, шт.:

$$q = \frac{Z}{2p \times m} \quad (2.6)$$

где m – число фаз.

При $q = 1$ в полюсе статора на одну фазу приходится только один паз, значит, катушка этой фазы не может быть разделена на секции. Такая обмотка называется сосредоточенной. При $q > 1$, обмотка называется рассредоточенной, при этом фазные катушки должны быть разделены на секции, число которых равно величине q. При $q = 2$ катушечная группа будет состоять из двух секций, при $q = 3$ – из трех секций и т. д. Суммарное число витков этих секций равно числу витков сосредоточенной фазной катушки.

2. 2. 4. Число электрических градусов на один паз (α). В расточке статора асинхронного двигателя распределение магнитного потока под одной парой полюсов подчиняется синусоидальному закону, т. е. по краям полюсов магнитных силовых линий нет, при приближении к центру число их плавно возрастает и в центре полюса достигает максимума.

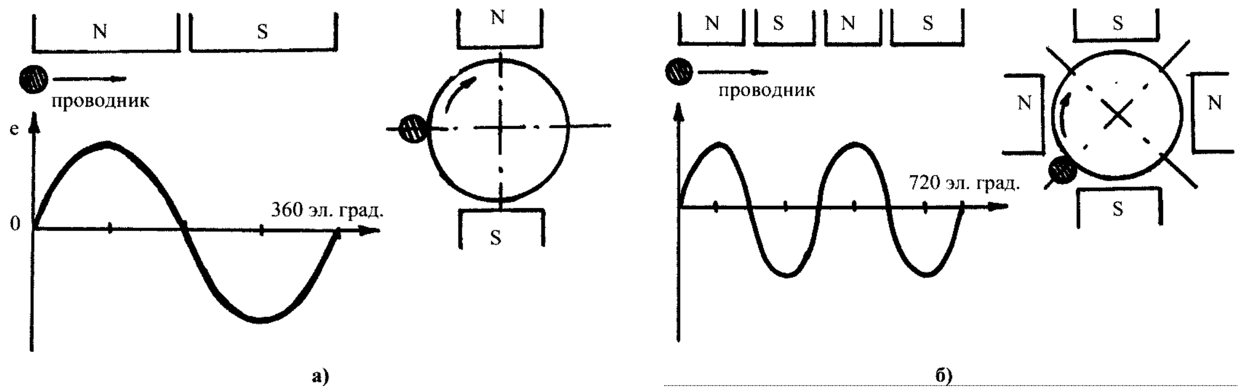


Рис. 2.1. Число электрических градусов в расточке статора электромашины в зависимости от числа пар полюсов *а* – при одной паре; *б* – при двух парах

Это показывает изменение *эдс* (e) в проводнике, если его провести (или сделать один оборот ротора) под одной парой полюсов. Известно, что $e = B \times l \times v$, где B – магнитная индукция, l – длина про водника, v – скорость его движения. Отсюда, при постоянных l и v изменение величины e зависит только от изменения величины B, рис. 2. 1, *а*.

При перемещении происходит полный цикл изменения величины e в проводнике, следовательно, так же меняется и магнитный поток (и индукция – B). Синусоида делится на 360 градусов, значит на одну пару полюсов приходится 360 электрических градусов (эл. гр.). При движении проводника под двумя парами полюсов (за один оборот), рис. 2. 1, б, *эдс* в нем изменится два раза по 360 электрических градусов (360×2 = 720 эл. гр.), то есть в общем случае, в любой машине число электрических градусов в расточке статора можно определить по формуле:

$$\alpha = 360 \times p \quad (2.7)$$

Если магнитопровод имеет число пазов равное Z, то число электрических градусов, приходящихся на один паз, или иначе угловой сдвиг между рядом лежащими пазами ? равен:

$$\alpha = \frac{360 \times p}{Z} \quad (2.8)$$

2. 2. 5. Число параллельных ветвей (a). Параллельные ветви в обмотке асинхронного двигателя делаются для сокращения сечения обмоточного провода, кроме того, в определенной мере, это дает возможность лучше загрузить магнитную систему машины. Все катушечные группы обмотки одной фазы могут быть соединены последовательно, как это показано на рис. 2. 2. В этом случае число параллельных ветвей равно 1 (a = 1), буквами Н, К и цифрами обозначены соответственно начала и концы фазных катушек.

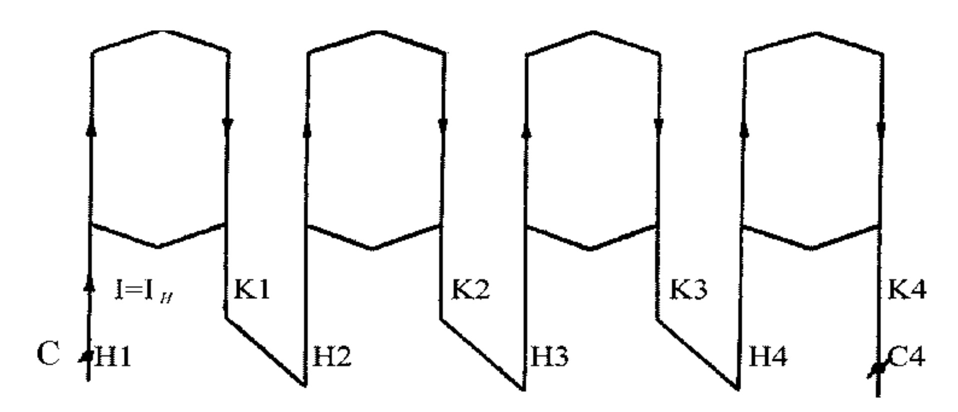


Рис. 2. 2. Катушечные группы включенные в одну параллельную ветвь a = 1.

При параллельном включении катушечных групп максимальное число параллельных ветвей равняется числу фазных катушек в обмотке одной фазе $N_{1Ф}$, например, на рис. 2. 3, *а*, a = 4. Можно катушечные группы обмотки одной фазы соединять и комбинированно (часть последовательно и часть параллельно) как показано на рис. 2. 3, *б*, a = 2, но при этом, в любом случае число катушечных групп в каждой параллельной ветви должно быть строго одинаковым.

Примечание. Решение о рациональном числе параллельных ветвей принимается только после разделения обмоточного провода на параллельные сечения – a'. Число параллельных сечений (т. е. взятых для изготовления секций обмоточных проводов) в сумме по площади должно быть равно расчетной площади. Например, если по расчету сечение (площадь) обмоточного провода должно быть равно 20 $мм^2$, а такого провода нет или он не входит через шлиц паза можно взять два провода по 10 $мм^2$ или четыре по 5 $мм^2$. Однако, число a' не должно быть более 4–х, вот тогда (для сокращения диаметра провода) увеличивают число параллельных ветвей – a.

Рассчитанные обмоточные данные используются по ниже приведённым методикам, в частности, для построения однослойных и двухслойных петлевых обмоток. Отличия в исполнении других обмоток незначительны.

2. 3. Принцип построения схемы статорной обмотки трехфазного асинхронного двигателя.

Для получения вращающегося магнитного поля трехфазного асинхронного двигателя при любой схеме обмотки требуется:

1. Смещение в пространстве расточки статора АД фазных обмоток одна относительно другой на 120 электрических градусов.

2. Смещение во времени токов, протекающих по этим обмоткам, на одну треть периода (следовательно, вектора, изображающие указанные токи на плоскости, будут сдвинуты на 120 электрических градусов). Первое условие выполняется соответствующей укладкой катушечных групп трехфазной обмотки, второе – подключением асинхронных двигателей к сети трехфазного тока, в которой временной сдвиг между напряжениями трех фаз обеспечивается генераторами электрических станций. Эти напряжения в замкнутых цепях обмоток машин создают нужный сдвиг токов.

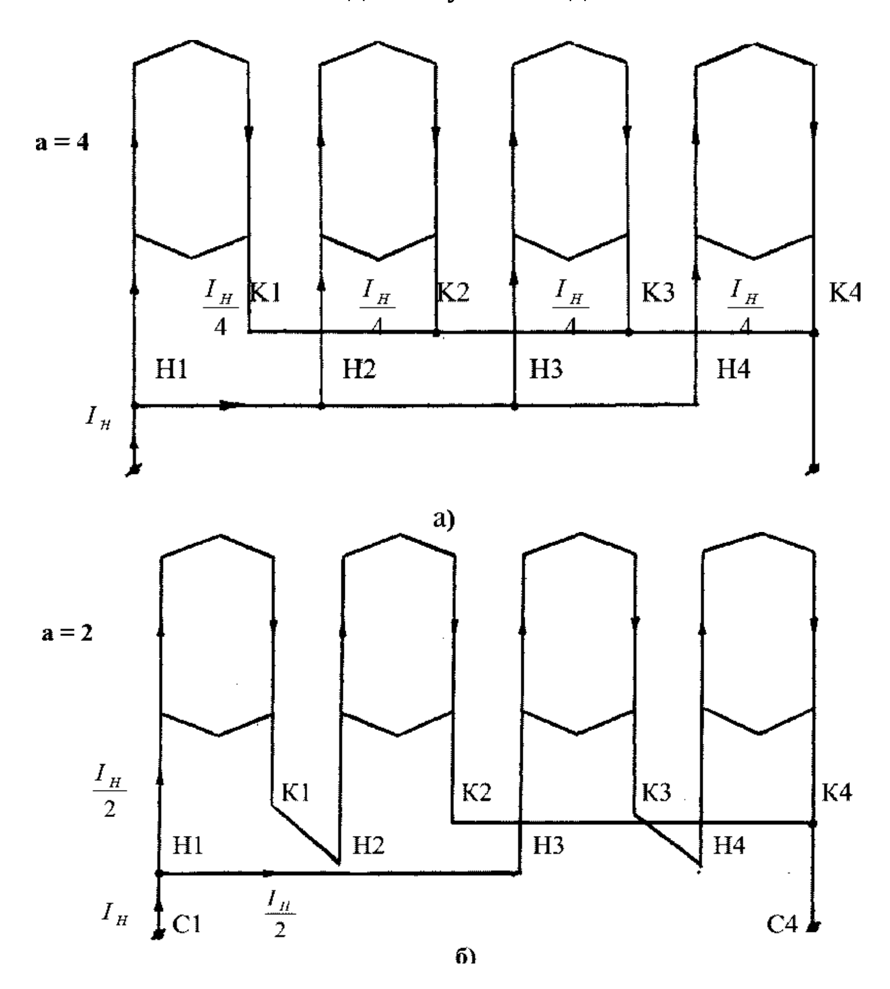


Рис. 2. 3. Катушечные группы обмотки одной фазы включенные:
а) в четыре параллельных ветви *а* = 4, *б*) в две параллельные ветви *а* = 2.

2. 3. 1. Построение однослойной обмотки.

Пусть статор имеет пазов магнитопровода Z = 24, Технические требования заказчика: частота вращения поля n = 1500 *мин*$^{-1}$, частота тока f = 50 *гц*. При построении схемы обмотка первой фазы может, в общем, начинаться из любого паза. В нашем случае первую активную сторону секции помещаем в первый паз (рис. 2.4). Определяем число пар полюсов по формуле:

$$p = \frac{60 \times f}{n} = \frac{60 \times 50}{1500} = 2$$

Находим шаг обмотки (секции) по формуле (2. 5):

$$y' = \frac{Z}{2p} \pm \varepsilon = \frac{24}{2 \times 2} = 6$$

Следовательно, при $y = y'$ вторую активную сторону секции помещаем через шесть зубцов в седьмой паз (рис. 2. 5), $y + 1 = 6 + 1$.

Определяем число пазов на полюс и фазу по формуле (2. 6):

$$q = \frac{Z}{2p \times m} = \frac{24}{2 \times 2 \times 3} = 2$$

Отсюда одна катушечная группа имеет две секции, тогда вторая секция занимает соответственно пазы 2 и 8 (рис. 2. 6).

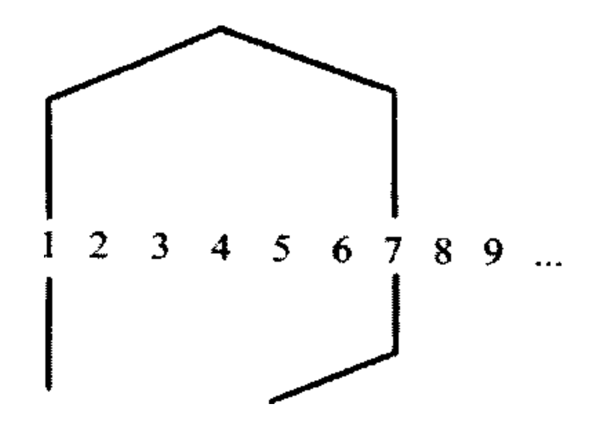


Рис. 2. 5. Размещение второй активной стороны секции в магнитопроводе.

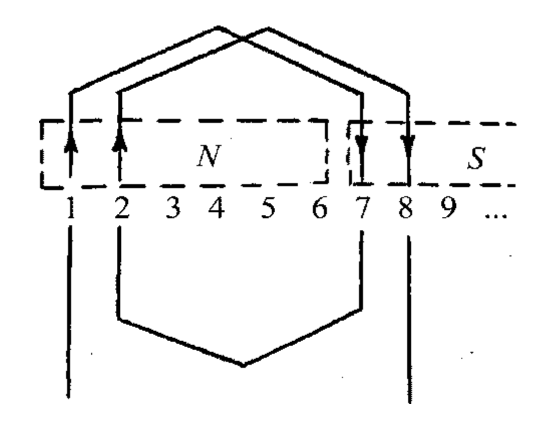


Рис. 2. 6. Размещение в магнитопроводе первой катушечной группы обмотки.

Число катушечных групп в однослойной обмотке одной фазы определим по формуле (2. 1)

$$N_{1\Phi}^{(1)} = p = 2$$

В какие пазы укладывается вторая катушечная группа той же самой фазы $N^{(1)}{}_{1\Phi} = 2$?
В однослойной обмотке первая катушечная группа участвует в создании первой пары полюсов (рис. 2. 7.), вторая – должна создавать вторую пару полюсов, следовательно, расстояние между ними должно быть равно одной паре полюсов, т. е. 360 эл. гр. Отсюда сдвиг между катушечными группами одной фазы в пазах равно:

$$A \to \frac{360}{\alpha}$$

где: α – число электрических градусов на один паз. Рассчитывается по формуле:

$$\alpha = \frac{360 \times p}{Z} = \frac{360 \times 2}{24} = 30 \text{ эл. гр.} \quad (2.9)$$

тогда:

$$A \to \frac{360}{\alpha} = \frac{360}{30} = 12 \text{ пазов} \quad (2.10)$$

Отсюда вторая катушечная группа фазы "А" начинается с 13 паза (рис. 2. 7).

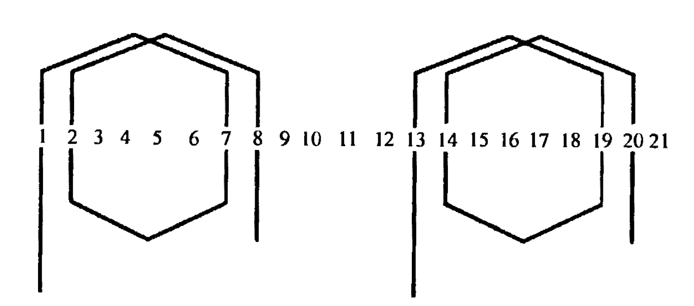


Рис. 2. 7. Размещение катушечных групп обмотки одной фазы.

Как соединить между собой уложенные катушечные группы?
Чтобы ответить на этот вопрос, вначале необходимо принять число параллельных ветвей *a*, которое далее уточняется после расчета сечения обмоточного провода (Пр). В предварительном расчете число параллельных ветвей можно брать произвольно, их максимальное количество, как указывалось, допустимо брать равным числу катушечных групп в одной фазе $N^{(1)}{}_{1\Phi}$. Однако пока неизвестно (Пр), рационально ли принимать *a* = 1. Затем необходимо показать направления токов в активных проводниках катушек исходя из закона чередования полюсов.
Если в машине 4 полюса (рис. 2. 8), то по направлению тока и можно соединить, только следующим образом: конец первой катушечной группы – с началом второй, что является законом для однослойных обмоток.

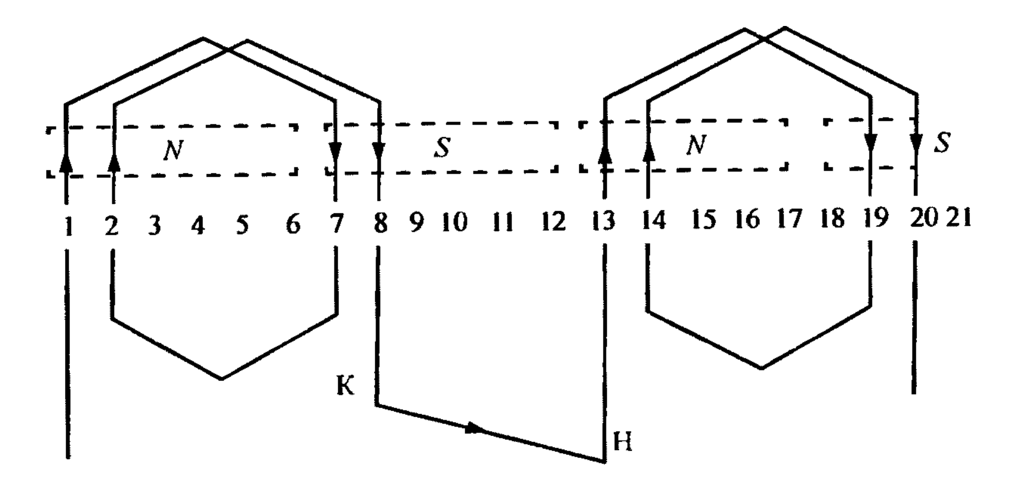


Рис. 2. 8. Направление токов в активных сторонах секции уложенных катушечных групп обмотки одной фазы и их соединение.

Обмотки фаз *B* и *C* выполняются аналогично, но согласно условию получения вращающегося магнитного поля, в расточке статора, они сдвинуты соответственно на 120 и 240 эл. гр. относительно обмотки фазы А, т. е. в пазах это будет:

$$B \to \frac{120}{\alpha} = \frac{120}{30} = 4 \qquad C \to \frac{240}{\alpha} = \frac{240}{30} = 8$$

Следовательно, обмотки фаз *B* и *C* начинаются соответственно в 5–м и 9–м пазах. Укладка их катушечных групп аналогична обмотке фазы *A*. В результате получаем обмотку асинхронного двигателя (рис. 2. 9).

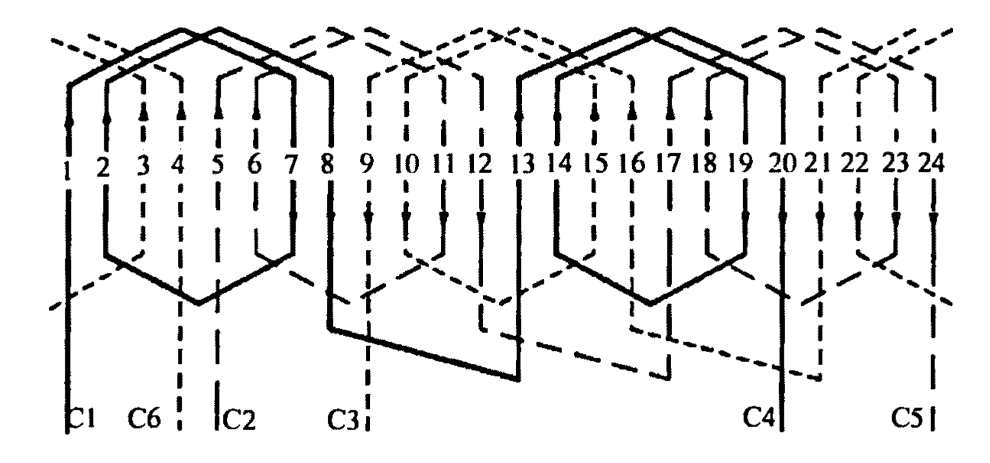


Рис. 2. 9. Развернутая схема однослойном статорной обмотки
при $N_{3\Phi}{}^{(1)} = 6, y = 6, q = 2, \alpha = 30°$; *a* = 1

Как определить полюса в расточке статора?

Направления токов в активных проводниках обмоток, а значит и положение полюсов в расточке статора, могут быть показаны только для данного момента времени *t*. Оно берется произвольно, например, на рис. 2, 9; 2. 11 *а*, *б* – $t = t_1$. Для принятого момента t_1 на развертке $I = f$ t (рис. 2. 10, *а*) соответствует векторная диаграмма токов рис. 2. 10, *б*. Из последней следует, что в момент t_1 токи в обмотках фаз “А” и “В” текут в одном направлении, а в обмотке фазы “С” в противоположном, причем сумма первых ($Ia + Ib$) равна Ic (закон Кирхгофа). Расстановка токов в активных проводниках по пазам расточки статора в соответствии с векторной диаграммой на (рис. 2. 11, *а*) при $a = 1$ и (рис. 2. 12. *б*) при $a = 2$ дает возможность найти положение полюсов для момента принятого времени.

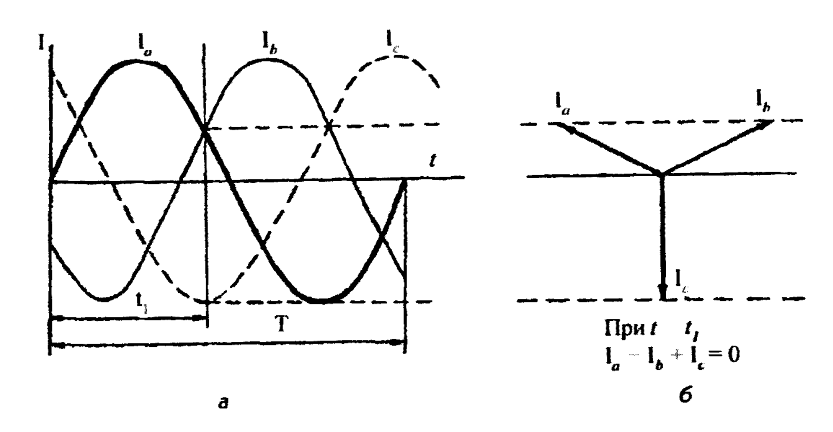


Рис. 2. 10. Развертка зависимости токов от времени (*а*) $I = f$t
и векторная диаграмма токов (*б*) для t_1.

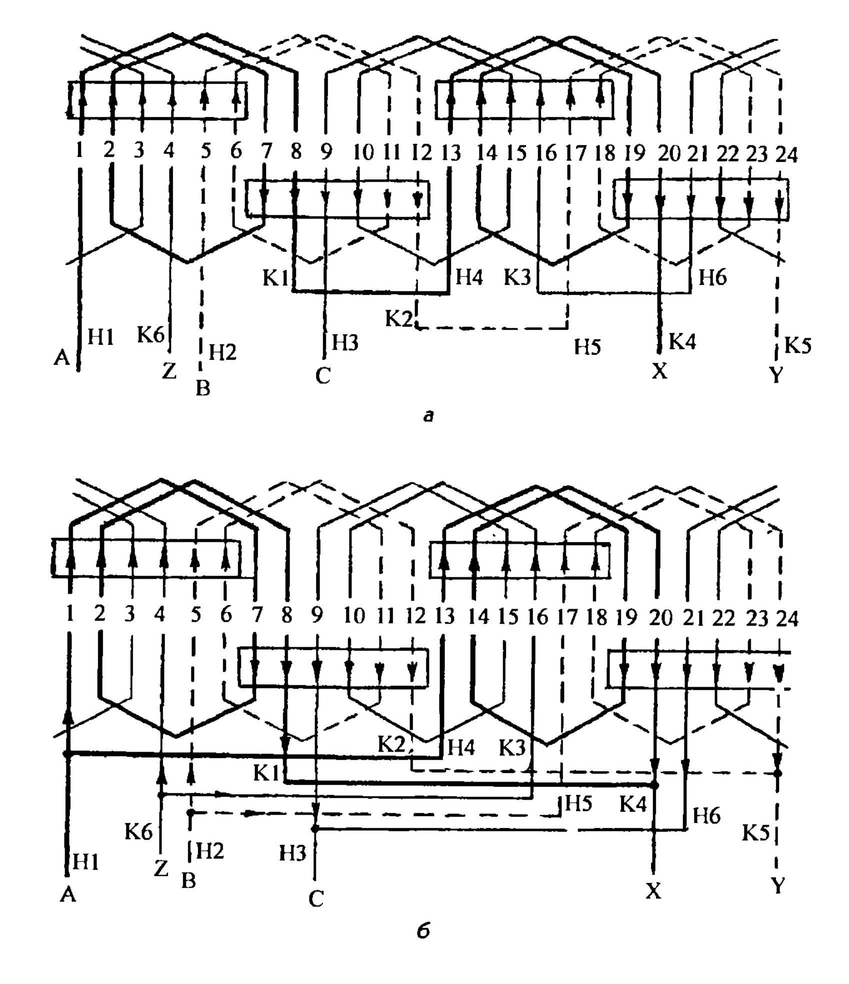


Рис. 2. 11. Развернутая схема однослойной статорной обмотки с положением полюсов, соответствующих времени t_1, при $a = 1$ (*а*) и 2 (*б*), $N_{3Ф}^{(1)} = 6$; $y = 6$; $q = 2$; $\alpha = 30°$.

Расстановка токов в активных проводниках по пазам расточки статора в соответствии с векторной диаграммой на (рис. 2. 11, *а*) при $a = 1$ и (рис. 2. 12, *б*) при $a = 2$ дает возможность найти положение полюсов для момента принятого времени.

2. 3. 2. Построение двухслойной обмотки.

В отличие от однослойных в двухслойных обмотках катушечных групп в два раза больше (2. 3):

$$N_{1\Phi}^{(2)} = 2 \times p = 4$$

Кроме того у одной и той же фазы они сдвигаются не на 360 эл. гр. (как в однослойных обмотках), а на 180 эл. гр. (!). Соединяются они между собой – конец предыдущей катушечной группы с концом последующей, а начало с началом (этого требует направление токов) см. (рис. 2. 10, *а*) и (рис. 2. 10, *б*). Отсюда, общее число катушечных групп в обмотке равно (2. 4)

$$N_{3\Phi}^{(2)} = 2 \times p \times m = 12$$

Все остальные обмоточные данные находятся по тем же самым выражениям, как и для однослойных обмоток:
– шаг обмотки (2. 5), следовательно $y = 6$,
– число пазов на полюс и фазу (2. 6) $q = 2$,
– число электрических градусов приходящихся на один паз (2. 8) = 30 эл. гр.
– число параллельных ветвей, $a = 1$.
Построение двухслойной обмотки (рис. 2. 12 *а* и *б*) принципиально ничем не отличается от построения однослойной и выполняется по следующим этапам:
– укладываются секции катушечных групп всех трех фаз;
– проводится соединение этих групп в обмотки с требуемым числом параллельных ветвей;
– для принятого момента времени (t_1), рис. 2. 10, показываются направления фазных токов в расточке статора, находится положение полюсов.

Индивидуальные задания для решения практической задачи № 2 студенты берут из Приложения 2 (табл. 2. 1, и 2. 2) по варианту, заданному преподавателем. Студентам необходимо самостоятельно произвести построение двух видов однослойной обмотки: простой концентрической и петлевой (цепной).

II – III. Индивидуальные задания к практической задаче №2 (все для $f = 50$ *гц*.)

Приложение 2. Таблица 2.1.

вариант	Z	n, *мин*$^{-1}$	U_Φ, *в*	вариант	Z	n, *мин*$^{-1}$	U_Φ, *в*
1	24	1500	380	14	36	1500	127
2	36	1500	127	15	48	3000	380
3	48	1500	380	16	24	3000	127
4	24	3000	127	17	36	3000	380
5	36	1500	380	18	48	1500	127
6	48	1500	127	19	24	3000	380
7	24	1500	380	20	36	3000	127
8	36	3000	127	21	24	1500	380
9	48	1500	380	22	36	3000	127
10	24	750	127	23	24	3000	380
11	36	1500	380	24	36	3000	127
12	48	750	127	25	24	1500	380
13	24	3000	380				

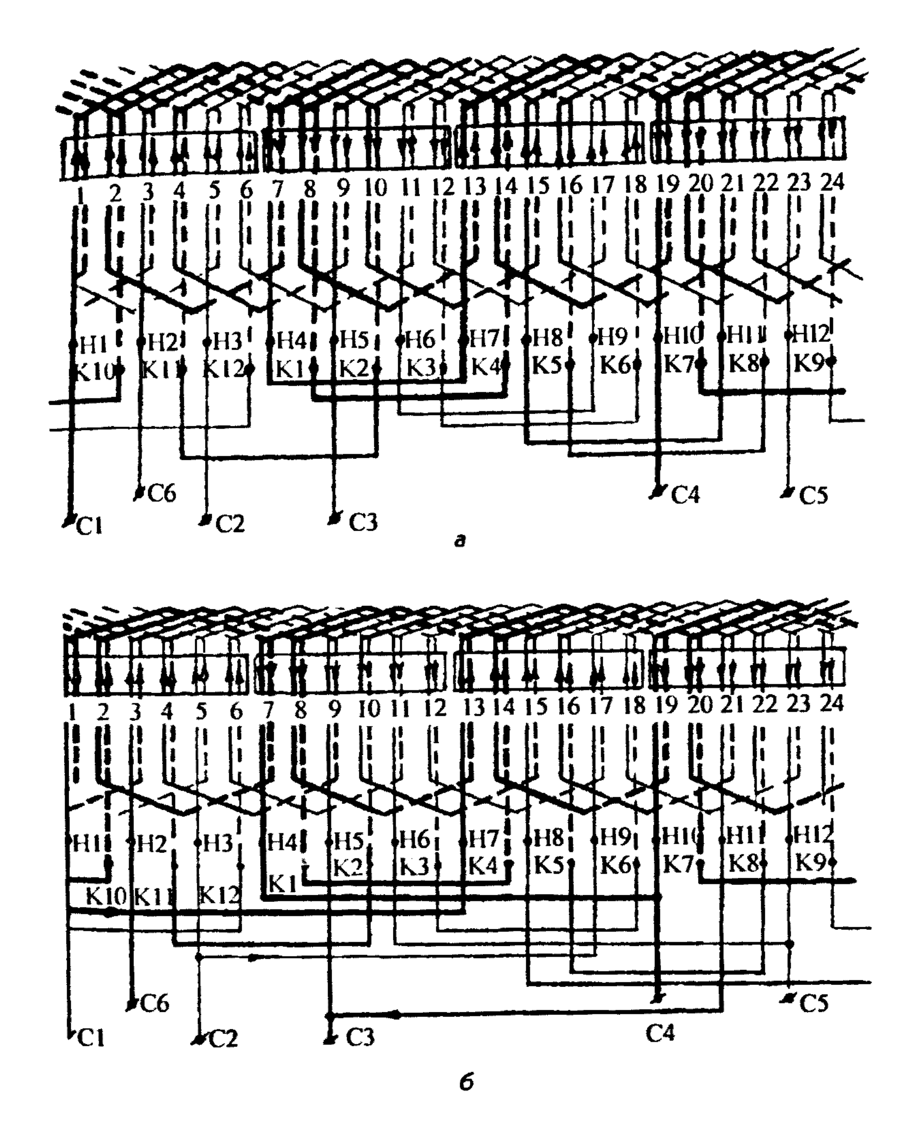


Рис. 2. 12. Развернутая схема двухслойной статорной обмотки при $N_{3Ф}^{(2)} = 12$, $y = 6$, $q = 2$, $\alpha = 30°$, $a = 1$ (*а*) и 2 (*б*)

Тема 3. Расчет числа витков в обмотке одной фазы и в одной секции.

Цель: Изучить методику определения числа витков в обмотке одной фазы асинхронного двигателя (wф) и в катушке одной ее секции (wсек).

III – I. Общие теоретические сведения по теме.

При подаче напряжения $U_Ф$ на обмотку по ней потечет ток холостого хода I_{XX} (рис. 3. 1). Так как напряжение изменяется по синусоидальному закону, ток тоже будет переменным. В свою очередь он создаст в магнитной системе машины магнитный поток Φ, который также будет переменным. Поток Φ индуктирует в витках обмотки, которая его создала, *эдс* ($E_Ф$), направленную встречно приложенному напряжению (закон электромагнитной индукции). *Эдс* фазной обмотки $E_Ф$ будет слагаться из суммы *эдс* отдельных витков $E_{1В}$, *в*.

$$E\text{ф} = \Sigma E_{1\text{В}} \quad \text{или} \quad E\text{ф} = E_{1\text{В}} \times w\text{ф} \quad (3.1)$$

где wф – количество витков в обмотке одной фазы.
Кроме того, ток Iхх создает на активном и реактивном сопротивлениях обмотки r и x падение напряжения $\Delta U = I \times r_1 + I \times x_1$.

Таким образом, приложенное к обмотке напряжение $U_Ф$ уравновешивается ЭДС $E_Ф$ и падением напряжения в обмотке ΔU. Математически в векторной форме все сказанное приведено на упрощенной векторной диаграмме асинхронного двигателя (рис. 46). Для наглядности рядом показана фактическая векторная диаграмма электромашины, при этом $U_Ф = U_1$, а $E_Ф = E_1$ Из изложенного (3. 1) и векторной диаграммы следует:

$$w\phi = \frac{E\phi}{E_{1В}} \quad (3.2)$$

где $E_{1В}$ – ЭДС одного витка обмотки, *в*.

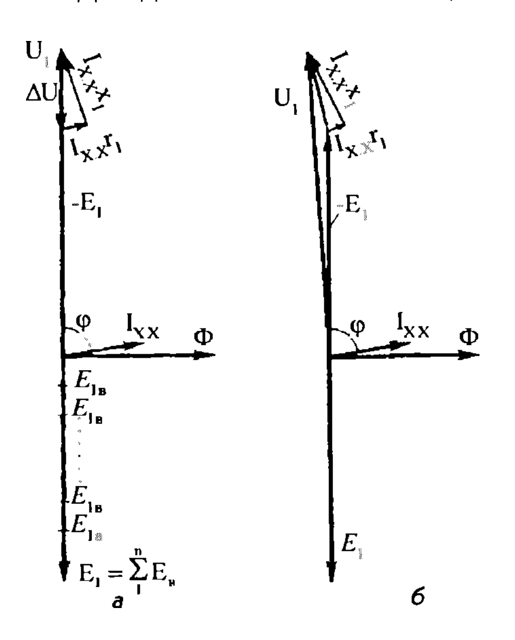


Рис. 3. 2. Векторные диаграммы асинхронного двигателя: упрощенная (*а*), фактическая (*б*).

Падение напряжения ΔU в обмотке АД приблизительно составляет 2,5 – 4,0% от $U\phi$ (в среднем около 3%). Отсюда без ущерба для точности расчета можно записать:

$$E_Ф = 0{,}97 \times U_\phi \quad (3.3)$$

где $E_Ф$ – *эдс* обмотки фазы, *в*; $U_Ф$ – фазное напряжение, *в.* Учитывая выражение (3. 3), уравнение (3. 2) примет вид:

$$w\phi = \frac{0{,}97 \times U_Ф}{E_{1\phi}} \quad (3.4)$$

Мгновенное значение ЭДС одного витка, как известно из теоретической электротехники, определяется из выражения:

$$e_{1В} = \frac{d\Phi}{dt} \quad (3.5)$$

t – время, *сек*.
Магнитный поток изменяется по закону:

$$\Phi = \Phi m \times sin\omega t \quad (3.6)$$

где Φm – амплитудное значение магнитного потока, *Вб*, ω – угловая частота вращения поля. Подставив уравнение (3. 6) в (3. 5) и взяв производную, получим:

$$e_{1Ф} = -\omega \times \Phi m \times cos\omega t = \omega \times \Phi m \times \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \quad (3.7)$$

Максимальное значение *эдс* одного витка будет при:

$$\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = 1$$

тогда (так как $\omega = 2\times\pi\times f$):

$$E_{1\text{В}m} = \omega \times \Phi m = 2\pi \times f \times \Phi m \quad (3.8)$$

Действующее значение отличается от максимального на $\sqrt{2}$ значит:

$$E_{1\text{В}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \times f \times \Phi m \quad (3.9)$$

У асинхронного двигателя обмотка редко бывает сосредоточенной, чаще всего $q > 1$. При этом часть магнитного потока Φ рассеивается, что учитывается *коэффициентом распределения* kр:

$$k\text{р} = \frac{sin\left(\alpha \times \frac{q}{2}\right)}{q \times sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (3.10)$$

Практически все двухслойные обмотки выполняются только укороченным шагом. Это приводит к тому, что на границах полюсов в секциях разных фаз, лежащих в одном пазу, направление токов будет встречное. Следовательно, суммарный магнитный поток от этих секций будет равен нулю, что уменьшает общий магнитный поток Φ. Это явление учитывается коэффициент укорочения Kу.
Для получения наиболее рационального Ку, при котором обеспечивается подавление высших гармоник магнитного потока, наиболее искажающих форму кривой его изменения, рекомендуется коэффициент укорочения шага брать равным 0,8. Отсюда шаг $y = 0{,}8 \times y'$. Следовательно, kу можно определить из выражения:

$$k\text{у} = sin\left(90 \times \frac{y}{y'}\right) \quad (3.11)$$

Для удобства расчетов пользуются произведением этих коэффициентов, которое называется обмоточным коэффициентом Kоб:

$$k\text{об} = k\text{р} \times k\text{у} \quad (3.12)$$

Тогда окончательно *эдс* одного витка равна:

$$E_{1\text{В}} = 4{,}44 \times f \times \Phi \times k\text{об} \quad (3.13)$$

Подставляя выражение (3. 13) в (3. 14), получим:

$$w\text{ф} = \frac{0{,}97 \times U\text{ф}}{4{,}44 \times f \times \Phi \times k\text{об}} \quad (3.14)$$

В выражении (3. 14) U_{Φ} и f заданы заказчиком, следовательно, для расчета wф требуется знать лишь магнитный поток Φ. Последний под полюсом распределяется неравномерно (рис. 3. 3).
Однако при равенстве площадей прямоугольника со стороной Bср и полусинусоиды с максимальным значением $B\delta$ величина магнитного поля Ф под полюсом будет одинаковой.

Значит:

$$B\text{ср} = \frac{B\delta}{\frac{\pi}{2}} = \frac{2}{\pi} \times B\delta \quad (3.15)$$

где: 2/π – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения магнитного потока под полюсом; Bср – среднее значение магнитной индукции в воздушном зазоре, *Тл.*; Bδ – максимальное значение магнитной индукции в воздушном зазоре, *Тл.* (табл. 3. 1). Отсюда величина магнитного потока $B\delta$, находится по формуле:

$$\Phi = \frac{2}{\pi} \times B\delta \times Q\delta \quad (3.16)$$

где $Q\delta$ – площадь полюса в воздушном зазоре, *м*^{2}.

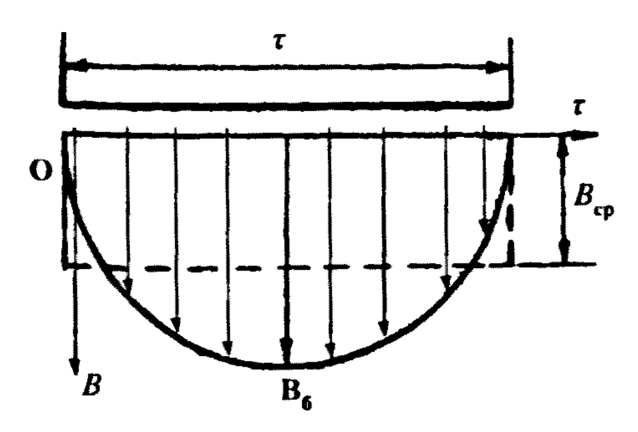


Рис. 3. 3. Распределение B под полюсом в воздушном зазоре.

3. 1. Расчет оптимального числа витков в обмотке одной фазы.

Цель расчета – определение рационального числа витков в равносекционной обмотке одной фазы асинхронного двигателя – wф', при котором величины магнитных нагрузок ($B\delta$, B_Z , B_C) будут оптимальны на всех участках магнитной цепи для данного АД (приблизительную полную мощность АД можно принять по приложению 3. 2. Sдв = f (D)). Такой расчет выполняется методом подбора. Полученная по формуле (3. 16) величина магнитного потока Φ требует уточнения, так как будучи подставленной в формулу (3. 14) дает, как правило, дробное число витков в обмотке wф или такое число, при котором они не могут быть разложены равномерно по секциям фазных катушек. Естественно, такая обмотка не выполнима, потому что с одной стороны часть витка в пазы уложить нельзя, с другой, секции в ней получаются с разным числом витков. Получение же нужной величины магнитного потока возможно, так как допустимые пределы магнитной индукции в воздушном зазоре $B\delta$ (табл. 3. 1) позволяют взять ее такой, при которой обмотка будет равносекционной, то есть с одинаковым числом витков в каждой секции. Условие равносекционности обмотки вытекает из выражения числа активных проводников в одном пазе, шт.:

$$N\text{п} = \frac{2 \times w\text{ф} \times m \times a}{Z} \quad (3.17)$$

где a – число параллельных ветвей, шт.

Виток имеет два активных проводника, тогда 2 × wф × m × a – полное число активных проводников в обмотке АД. Из выражения (3. 17) можно сделать следующий вывод:

Чтобы число витков в секциях обмотки было одинаковым, необходимо число активных проводников в пазу Nп округлить, при этом для однослойной обмотки просто до целого значения, а для двухслойной – до целого и четного.
После округления Nп выполняется уточнение число витков в фазе wф' по формуле, шт:

$$w\text{ф}' = \frac{N\text{п}' \times Z}{2 \times m \times a} \quad (3.18)$$

Таблица 3. 1.

Нормированные электромагнитные нагрузки асинхронных двигателей

наименование	мощность, *квт*.		
	до 1	1 – 10	10 – 100
индукция в воздушном зазоре, $B\delta$	0,3 – 0,6	0,6 – 0,7	0,7 – 0,9
индукция в зубцах статора, B_Z	1,3 – 1,5	1,4 – 1,6	1,4 – 1,8
индукция в спинке статора, B_C	1,1 – 1,5	1,2 – 1,6	1,3 – 1,6

Примечание. Однослойные обмотки, как правило, не дают возможности укорачивать шаг для подавления высших гармоник *Ф*. Это ведет к дополнительному нагреву стали магнитопровода по сравнению с двигателями, у которых двухслойная обмотка имеет укороченный шаг. Исходя из сказанного, для электрической машины с однослойной обмоткой магнитные индукции на всех участках магнитной цепи берутся ближе к нижнему пределу, для двухслойных – к большему. Если асинхронный двигатель работает в помещениях с постоянной повышенной температурой, следует брать магнитные индукции ($B\delta$, B_Z, B_C) ближе к нижнему пределу. Но это еще не все. Полученная равносекционная обмотка с числом витков на фазу wф'' должна **полностью использовать магнитную систему** двигателя **по *магнитной* нагрузке** на всех участках ее цепи. В первую очередь, должны строго входить в нормы величины B_Z и B_C, приведенные в таблице 3. 1.
Дело в том, что электротехническая сталь, как известно, обладает насыщением. Поэтому расчетное повышение магнитных нагрузок B_Z и B_C сверх рекомендованных не приведет к их фактическому значительному увеличению. Резко возрастет лишь ток холостого хода I_{XX} (см. зависимость $B = f$ (Н), рис. 3. 4), причем он может оказаться значительно больше номинального. Следовательно, завышение величин B и I_{XX} увеличит только нагрев стали сердечника (т. к. $P_{XX} = B^2$) и вызовет перегрев обмотки (т. к. $P_{КЗ} = I^2$). Занижение величин B, а значит и магнитного потока $Ф$, занизит мощность машины.

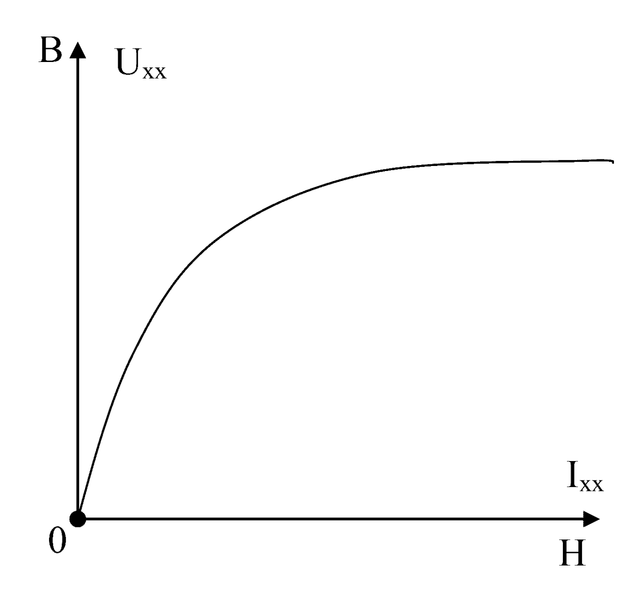


Рис. 3. 4. Зависимость $B = f$(Н)

Проверка равносекционной обмотки по нагрузкам магнитной цепи. Магнитные индукции зависят от величины магнитного потока Ф, который при округлении до *w*ф'' изменится и будет равен, *Вб*:

$$Ф'' = \frac{0{,}97 \times U_{Ф}}{4{,}44 \times f \times k_{ОБ} \times wф''} \quad (3.19)$$

Так как поток Ф" в магнитной системе электромашины на всех участках неизменный (Ф = const)., то значения $B\delta$, B_Z, B_C, , зависят от площадей участков магнитной цепи: в воздушном зазоре – $Q\delta$, в зубцовой зоне – Q_Z, в спинке статора – Q_C. Следовательно, плотности магнитного потока (магнитные индукции) на указанных участках будут не одинаковыми и равными, *Тл.*:

$$B\delta = \frac{Ф''}{\frac{2}{\pi} \times Q\delta} \quad (3.20)$$

$$B_Z = \frac{Ф''}{\frac{2}{\pi} \times Q_Z} = B\delta \times \frac{Q\delta}{Q_Z} \quad (3.21)$$

$$B_C = \frac{Ф''}{2 \times Q_C} = B\delta \times \frac{2}{\pi} \times \frac{Q\delta}{2 \times Q_C} \quad (3.22)$$

В зубцовой зоне магнитопровода АД распределение магнитной индукции B_Z практически остается таким же, как в воздушном зазоре, поэтому коэффициент 2/π в выражении (3. 21) сохраняется, как и при определении $B\delta$. В формуле расчета B_C (3. 22) учитывается, что магнитный поток *Ф*" в спинке статора распределяется по всей площади равномерно (отсюда коэффициента 2 нет), а также то, что в спинке магнитопровода этот поток разделяется на две части, рис. 3. 4, (вот почему в знаменателе формулы появилась двойка).

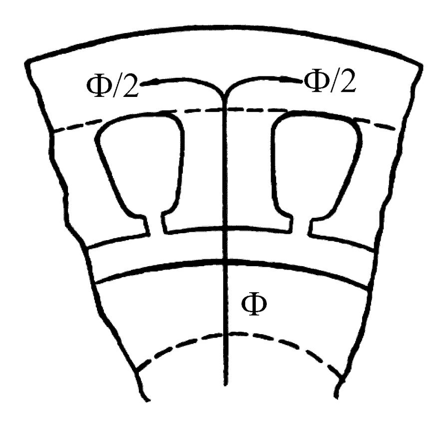


Рис. 3. 4. Распределение магнитного потока в спинке статора.

Полученные магнитные нагрузки B_Z и B_C сравниваются с допустимыми. Они должны быть, как уже говорилось, в пределах величин указанных в табл. 3. 1, т. е. оптимальными (наивыгоднейшими). Если магнитная нагрузка на каком–либо участке магнитной цепи (в электротехнической стали) выше нормы, необходимо повторить расчет начиная с формулы *w*ф'' (3. 18), увеличив число проводников в пазу *N*п, если ниже – необходимо уменьшить число проводников в пазу. Тем самым соответственно уменьшается или увеличивается магнитный поток *Ф*". Однако даже если на всех участках магнитной цепи индукции вошли в пределы установленных норм, это не значит, что расчет может быть окончен.

Рассчитываемый двигатель должен иметь оптимальные параметры, т. е. из его магнитопровода должна быть "выжата" максимально–возможная мощность.

Естественно, при этом $B\delta$, B_Z, B_C должны иметь наибольшие значения из приведенных в табл. 3. 1 норм, с учетом состояния электротехнической стали, при новой $B\delta$, B_Z, B_C – берутся ближе к большему пределу и наоборот. Вот почему выполняя поставленную цель, меняют Nп и выполняют несколько вариантов расчетов магнитных нагрузок.
Для наглядности проводимого подбора рационального числа витков в обмотке одной фазы асинхронного двигателя результаты всех расчетов wф обычно сводятся в таблицу (например, по форме табл.3. 2).
Исходя из вышеизложенного, учитывается, что при пересчете АД на другую частоту вращения нарушается согласование площадей участков магнитной цепи ($Q\delta$, Q_Z, Q_C). Отсюда магнитная индукция одного из участков в стали (B_Z или B_C) может оказаться меньше нормы, тогда как другая в норме. Однако, если увеличить магнитную индукцию в первом участке, во втором она увеличится сверх нормы. Такое превышение вызывает перегрев стали, ускоренное старение изоляции и выход машины из строя, она просто "сгорит". Поэтому, несмотря на то, что один из участков магнитной цепи оказывается не догруженным, а следовательно будет иметь место некоторое занижение мощности асинхронного двигателя, рациональным числом витков wф принимается то, при котором ни B_Z ни B_C не выходят за пределы норм.

Таблица 3. 2.

Нагрузка магнитной цепи при числе витков wф".

наименование величин	расчетная формула	варианты расчета			допустимые пределы
		1	2	3	
число проводников в пазе, Nп	$N\text{п} = \frac{2 \times w\text{ф} \times m \times a}{Z}$				
число витков в обмотке одной фазз, wф''	$w\text{ф} = \frac{N\text{п} \times Z}{2 \times m \times a}$				
величина магнитного потока при wф, $B\delta$	$\Phi = \frac{0{,}97 \times U_\Phi}{4{,}44 \times f \times k_{\text{ОБ}} \times w\text{ф}''}$				
индукция в воздушном зазоре, B_C	$B\delta = \frac{\Phi}{\frac{2}{\pi} \times Q\delta}$				табл. 2
индукция в зубцовой зоне, B_Z	$B_Z = \frac{\Phi}{\frac{2}{\pi} \times Q_Z}$				табл. 2
индукция в спинке статора, B_C	$B_C = \frac{\Phi}{2 \times Q_C}$				табл. 2

Кроме того, надо добавить, что при изменении частоты вращения у асинхронного двигателя после ремонта может иметь место: "залипание" – ротор не проворачивается при включении машины в сеть, "застревание" – ротор вращается на значительно пониженных оборотах, “повышенный шум’’. Причины кроятся в содержании высших гармонических составляющих в магнитном потоке электромашины, а это связано с нарушением соотношения между числами зубцов магнитопровода статора Z_1 и ротора Z_2. Вот почему при такой модернизации асинхронного двигателя обязательно проводится проверка на допустимость ее проведения. Для предупреждения "прилипания" ротора в момент пуска требуется, чтобы:

$$Z_2 \neq Z_1; \quad Z_2 = 0{,}5 \times Z_1; \quad Z_1 \neq 2 \times Z_1 \quad (3.\ 23)$$

Кроме того,

$$Z_2 = (2p \times 3) \times i \quad (3.24)$$

где i – любое целое число, p – число пар полюсов.

Для предупреждения "застревания" ротора на пониженной частоте вращения, требуется чтобы:

$$Z_2 \neq 2p \times 3 \times i + 2p = 2p \times (3 \times i + 1) \quad (3.25)$$

кроме того:

$$Z_2 \neq Z_1 \pm p \quad Z_2 \neq Z_1 \pm 2p$$

$$Z_2 \neq 0{,}5 \times Z_1 \pm p \quad Z_2 \neq 2 \times Z_1 \pm 2p \quad (3.26)$$

Для предупреждения "повышенного шума" электродвигателя, требуется чтобы:

$$Z_2 \neq 2p \times 3 \times i \pm 1$$

$$Z_2 \neq 2p \times 3 \times i \pm (2p \pm 1) \quad (3.27)$$

3. 2. Упрощенное определение числа проводников в одном пазе, Nп.

Целью расчета является сокращение вычислений подбора рационального числа витков wф. Для этого в выражение Nп (3. 17) подставляется значение wф (3. 14) и получается, что:

$$N\text{п} = \frac{2 \times m \times a \times 0{,}97 \times U_\Phi}{4{,}44 \times f \times \Phi \times k_{\text{ОБ}} \times Z} \quad (3.28)$$

Если f = 50 *гц*, коэффициент $k_{\text{ОБ}} \approx 0{,}97$ то с допустимыми округлениями формула (3. 28) принимает вид:

$$N\text{п} = \frac{a \times U_\Phi}{37 \times \Phi \times Z} \quad (3.29)$$

В полученном выражении неизвестен только магнитный поток Φ. Его можно определить по известным допустимым величинам магнитной индукции (табл. 3. 1) или в зубцовой зоне B_Z по формуле (3. 30), или в спинке статора $B_{\text{С}}$ по формуле (3. 31), так как Ф на всех участках магнитной цепи неизменен. Тогда, $B\delta$:

$$\Phi = \frac{2}{\pi} \times B_Z \times Q_Z \quad (3.30) \quad \text{или} \quad \Phi = B_C \times 2 \times Q_C \quad (3.31)$$

где: 2/π – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения магнитного потока в зубцовой зоне сердечника статора; 2 – коэффициент в формуле (3. 31) учитывает разделение магнитного потока Ф в спинке статора на два направления.

Следует учитывать, что если магнитопровод рассчитываемой электромашины был выполнен для числа полюсов, не соответствующих запроектированной частоте вращения (т. е. nн – изменено), между площадями магнитной цепи ($Q\delta$, $Q_{\text{С}}$, и Q_{Z}), как уже говорилось, нарушается согласование. В этом случае формула расчета магнитного потока Φ зависит от соотношения площадей Q_{Z} и $Q_{\text{С}}$.

Причем, если:

$$\frac{2 \times Q_C}{Q_Z} \geq 1{,}15 \quad (3.32)$$

т. е. nз < nн, (где nз – заданная заказчиком частота вращения), Φ следует определять только по магнитной индукции в зубцовой зоне B_Z (3. 30).

Если менее 0,75 (nз > nн,) , то рассчитывать Φ можно только по магнитной индукции в спинке статора B_C (3. 31). Полученную из формулы (3. 29) число активных проводников в пазу $N_{\text{П}}$ подставляют в выражение (3. 18) и находят число витков в обмотке одной фазы wф''.

При этом, в случае сомнения, можно вновь определить уточненный магнитный поток – Φ (3. 19) и индукции: в зубцовой зоне – B_Z (3. 21), а также в спинке статора – B_C (3. 22), затем сравнить полученные результаты с допустимыми величинами табл. 3. 1. Если потребуется – проводится коррекция.

3. 3. Число витков в секции обмотки.

В *однослойной* обмотке активные проводники $N_{\text{П}}$ одной секции полностью занимают паз, поэтому число витков ($w^{(1)}$сек) в ней равно числу этих проводников в пазу.
В *двухслойной* обмотке в одном пазу лежат активные проводники двух секций, следовательно, число витков в секции ($w^{(2)}$сек) равно половине числа активных проводников в пазу:

$$w_{\text{сек}}^{(2)} = \frac{N\text{п}}{2} \quad (3.34)$$

III – II. Практическое использование теории в расчетах.

Задача 3. 1.

Определить рациональное число витков в двухслойной обмотке одной фазы и одной секции трехфазного асинхронного двигателя с параметрами: фазное напряжение U_{Φ} = 220 *в*; частота вращения поля в расточке статора n = 1500 *об. мин.*; частота тока, f = 50 *гц*; число пазов в магнитопроводе Z = 48 шт; внутренний диаметр расточки магнитопровода статора D = 197 *мм.*; площадь полюса в воздушном зазоре $Q\delta$ = 0,0224 *м*^{2}; площадь полюса в зубцовой зоне Q_Z = 0,013 *м*^{2}; площадь поперечного сечения спинки статора Q_C = 0.0051 *м*^{2}; полный (диаметральный) шаг обмотки y = 12; число пазов на полюс и фазу q = 4; число электрических градусов 15 (эл. гр.); число параллельных ветвей обмотки принять равной единице (a =1).

Решение. Рассчитаем число витков в обмотке одной фазы трехфазного асинхронного двигателя – w_{Φ}. Для упрощения расчета определяем дополнительные исходные данные:
– количество пар полюсов (1. 3):

$$P = \frac{60 \times f}{n} = \frac{60 \times 50}{1500} = 2\ \text{шт.}$$

Приблизительную полную мощность асинхронного двигателя – $S_{\text{ДВ}}$. Ее находим по зависимости от внутреннего диаметра магнитопровода статора $S_{\text{ДВ}} = f(D)$ (см. прил. 3. 2.).
При D = 197 *мм.* и числе пар полюсов p = 2 шт, $S_{\text{ДВ}}$ = 17 – 18 *кВА*
Укороченный шаг обмотки с округлением $y = 0{,}8 \times y' = 0{,}8 \times 12 = 10$ зубцов.
Номинальная мощность трехфазного асинхронного двигателя ($P_{\text{Н}}$) меньше полной на величины cosφ и *кпд* (η). Учитывая это, рекомендованную магнитную индукцию в воздушном зазоре (табл. 3. 1) берем в интервале мощностей от 10 – 100 *квт* ($B\delta$ = 0,7 – 0,9 *Тл*). По данным осмотра и документов электромашина отработала более половины своего ресурса, отсюда принимаем $B\delta$ = 0,75 *Тл.*
Величина магнитного потока (3. 16):

$$\Phi = \frac{2}{\pi} \times B\delta \times Q\delta = \frac{2}{3{,}14} \times 0{,}75 \times 0{,}0224 = 0{,}011\ \text{Вб}$$

Предварительное число витков в обмотке одной фазы (3. 14):

$$w\text{ф} = \frac{0{,}97 \times U_{\Phi}}{4{,}44 \times f \times \Phi \times k_{\text{ОБ}}} = \frac{0{,}97 \times 220}{4{,}44 \times 50 \times 0{,}011 \times 0{,}925} = 94{,}48\ \text{шт.}$$

где $k_{\text{ОБ}}$ – обмоточный коэффициент, находим:
– по коэффициенту распределения обмотки (3. 10):

$$k\text{р} = \frac{sin\left(\alpha \times \frac{q}{2}\right)}{q \times sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} = \frac{sin\left(15 \times \frac{4}{2}\right)}{4 \times sin\left(\frac{15}{2}\right)} = 0{,}958$$

– по коэффициенту укорочения (3. 11):

$$k\text{у} = sin\left(90 \times \frac{y}{y'}\right) = sin\left(90 \times \frac{10}{12}\right) = 0{,}966$$

следовательно, $k_{\text{ОБ}}$ (3. 12):

$$k_{\text{ОБ}} = k\text{р} \times k\text{у} = 0{,}958 \times 0{,}966 = 0{,}925$$

Число витков в обмотке wф не может быть дробным, так как 0,48 витка положить в паз невозможно, отсюда (после округления) wф’ = 94 шт. Для выполнения условия равносекционности определяем число активных проводников в одном пазу (3. 17):

$$N\text{п} = \frac{2 \times w\text{ф} \times m \times a}{Z} = \frac{2 \times 94 \times 3 \times 1}{48} = 11{,}75 \text{ шт.}$$

После округления для двухслойной обмотки – $N_{\text{П}}$ = 12. Следовательно, предварительное число витков в обмотке одной фазы будет равно (3. 18):

$$w\text{ф}'' = \frac{N\text{п} \times Z}{2 \times m \times a} = \frac{12 \times 18}{2 \times 3 \times 1} = 96$$

где wф” – целое и четное число, а значит округлений, изменений не требует.
Проверяем нагрузку магнитной цепи сердечника статора АД при wф” = 96 витков.
Магнитный поток (3. 19):

$$\Phi = \frac{0{,}97 \times U_{\Phi}}{4{,}44 \times f \times k_{\text{ОБ}} \times w\text{ф}''} = \frac{0{,}97 \times 220}{4{,}44 \times 50 \times 0{,}925 \times 96} = 0{,}0108 \text{ Вб}$$

Магнитные индукции (с округлениями).
в воздушном зазоре из формулы (3. 20):

$$B\delta = \frac{\Phi}{\frac{2}{\pi} \times Q\delta} = \frac{0{,}0108}{\frac{2}{3{,}14} \times 0{,}0224} = 0{,}727 \text{ Тл.}$$

в зубцовой зоне (3. 21):

$$B_Z = \frac{\Phi}{\frac{2}{\pi} \times Q_Z} = B_Z = \frac{0{,}0108}{\frac{2}{3{,}14} \times 0{,}013} = 1{,}3 \text{ Тл.}$$

в спинке статора (3. 22):

$$B_C = \frac{\Phi}{2 \times Q_C} = \frac{0{,}0108}{2 \times 0{,}0051} = 1{,}06 \text{ Тл.}$$

Из табл. 3. 1 следует, что полученные магнитные нагрузки B_C и B_Z меньше допустимых, что позволяет увеличить магнитный поток Φ (без перегрева стали) путем уменьшения числа витков в обмотке. А это, в свою очередь, разрешает увеличить сечение провода в пазу, номинальный ток и наконец мощность АД (см. формулы расчета далее). Изменение $N_П$ меняет wф, поэтому в формуле (3. 18) принимаем $N_П$ = 10 (вместо $N_П$ = 12), тогда

$$wф'' = \frac{Nп \times Z}{2 \times m \times a} = \frac{10 \times 18}{2 \times 3 \times 1} = 80 \text{ витков}$$

Далее расчет выполняется в том же порядке, как и ранее по формулам (3. 19), (3. 21), (3. 22) рассчитываются Φ, B_C и B_Z с проверкой последних по допустимым величинам табл. 3. 1. Для удобства все расчеты сводим в таблицу по форме 3. 2.

Нагрузка магнитной цепи при числе витков wф”

наименование величин	расчетная формула	варианты расчета			допустимые пределы
		1	2	3	
число проводников в пазе, Nп	$Nп = \frac{2 \times wф \times m \times a}{Z}$	12	10	8	
число витков в обмотке одной фазы, wф''	$wф = \frac{Nп \times Z}{2 \times m \times a}$	96	80	64	
величина магнитного потока при wф, $B\delta$	$\Phi = \frac{0{,}97 \times U_Ф}{4{,}44 \times f \times k_{ОБ} \times wф''}$	0,0108	0,0130	0,016	
индукция в воздушном зазоре, B_C	$B\delta = \frac{\Phi}{\frac{2}{\pi} \times Q\delta}$	0,757	0,91	1,12	0,7 – 0,9
индукция в зубцовой зоне, B_Z	$B_Z = \frac{\Phi}{\frac{2}{\pi} \times Q_Z}$	1,3	1,57	1,93	1,4 – 1,8
индукция в спинке статора, B_C	$B_C = \frac{\Phi}{2 \times Q_C}$	1,06	1,27	1,57	1,3 – 1,6

Анализ расчетов показывает, что при числе витков в обмотке одной фазы, равном 80, нагрузки в магнитной цепи сердечника АД наиболее удовлетворяют установленным нормам (табл. 3. 1). Повышение или понижение wф” приводит к значительному ухудшению загрузки магнитопровода. Отсюда – для изготовления двухслойной обмотки трехфазного асинхронного двигателя принимаем число витков wф = 80.

Рассчитаем число витков в одной секции двухслойной обмотки трехфазного асинхронного двигателя – $w^{(2)}_{СЕК}$. Так как при числе витков в обмотке одной фазы равной 80, число проводников в одном пазу равно 10 ($N_П$ = 10). Тогда для двухслойной обмотки число витков в одной секции равно (3. 34)

$$w_{сек}^{(2)} = \frac{Nп}{2} = \frac{10}{2} = 5 \text{ шт.}$$

Задача 3. 2.

Определить упрощенным методом рациональное число витков в двухслойной обмотке одной фазы и одной секции трехфазного асинхронного двигателя.

Данные магнитопровода:внутренний диаметр расточки статора D = 105 *мм*.; площадь полюса в зубцовой зоне Q_Z = 0,0032 $м^2$; площадь спинки статора QC = 0,0019 $м^2$; число пазов Z = 36 шт. Технические задания заказчика: фазное напряжение $U_Ф$ = 220 *в*; частота вращения 1000 *об. мин*.; частота тока f = 50 *гц*. Число параллельных ветвей обмотки примем равной единице (a = 1).

Решение. Рассчитаем число витков в обмотке одной фазы трехфазного асинхронного двигателя – wф. Количество пар полюсов, шт. их выражения (1. 3) будет:

$$p = \frac{60 \times f}{n} = \frac{60 \times 50}{1000} = 3 \text{ шт.}$$

Находим приблизительную полную мощность аси нхронного двигателя $S_{ДВ}$ по зависимости от внутреннего диаметра магнитопровода статора $S_{ДВ}$ = f(D) (см. приложение 3. 2.). При D = 105 *мм*. и числе пар полюсов p = 3 шт, $S_{ДВ}$ 1 *ква*. С учетом *cos*φ� и *кпд* (η) мощность АД $P_Н$ будет менее 1 *квт*. Определяем соотношение площадей в спинке статора и зубцовой зоне магнитопровода (3. 32):

$$\frac{2 \times Q_C}{Q_Z} = \frac{2 \times 0{,}0019}{0{,}0032} = 1{,}18$$

Следовательно расчет магнитного потока выполняем по формуле (3. 30), так как 1,18 > 1,15 т. е. nз < nн . Для этого по табл. 3. 1 (в интервале $P_Н$ до 1 *квт*) берем B_Z равной 1,4 Тл.

$$Ф = \frac{2}{\pi} \times B_Z \times Q_Z = 0{,}637 \times 1{,}4 \times 0{,}0032 = 0{,}0029 \text{ Вб}$$

Число активных проводников в одном пазу (3. 29):

$$N\text{п} = \frac{U_Ф \times a}{37 \times Ф \times Z} = \frac{220 \times 1}{37 \times 0.0029 \times 36} = 56{,}95 \text{ шт.}$$

Округляем полученную величину до целого и четного значения Nп = 58 проводников. Рассчитаем число витков в обмотке одной фазы трехфазного асинхронного двигателя wф (3. 18):

$$wф'' = \frac{N\text{п} \times Z}{2 \times m \times a} = \frac{58 \times 36}{2 \times 3 \times 1} = 348 \text{ витков}$$

Проведем проверку полученного числа витков. Магнитный поток (3. 19):

$$Ф = \frac{U_Ф}{4{,}44 \times f \times wф''} = \frac{220}{4{,}44 \times 50 \times 348} = 0{,}00285 \text{ Вб}$$

где 0,97 в числителе и $k_{ОБ}$ в знаменателе сокращены (близкие по значению).
Магнитная индукция в зубцовой зоне (3. 21):

$$B_Z = \frac{Ф}{\frac{2}{\pi} \times Q_Z} = \frac{0{,}00285}{\frac{2}{3{,}14} \times 0{,}0032} = 1{,}398 \text{ Тл.}$$

Магнитная индукция в спинке статора (3. 22):

$$B_C = \frac{\Phi}{2 \times Q_C} = \frac{0{,}00285}{2 \times 0{,}0019} = 0{,}75 \text{ Тл.}$$

Величина магнитной индукции B_C значительно ниже допустимой, что объясняется нарушением согласования площадей магнитной цепи, так как заданная заказчиком частота вращения поля в расточке статора (nз= 1000 *мин*$^{-1}$) не соответствует той, на которую изначально был номинально рассчитан магнитопровод электромашины. Это позволяет, несмотря на остаточный ресурс машины, увеличить индукцию B_Z до предельного верхнего значения (1,5 *Тл.*), путем уменьшения числа витков в обмотке одной фазы, т. е. принять Nп равным 54 активным проводникам. Действительно, в этом случае wф" будет равно 324 витка, Φ = 0,003 *Вб*, B_Z = 1,5 Тл, B_C = 0,79 Тл.

Примечание. В заключение, еще раз следует подчеркнуть, что нарушение согласования площадей в магнитной цепи электрической машины не только понижает ее мощность, но и резко ухудшает эксплуатационные показатели работы двигателя, ведет к перерасходу электрической энергии в сети. Поэтому ремонт АД с изменением номинальной частоты вращения должен быть обязательно технико–экономически обоснован. Так же обязательно требуется проверка согласования числа зубцов статора Z_1 и ротора Z_2 по формулам (3. 23 – 3. 27).

Рассчитаем число витков в одной секции двухслойной обмотки трехфазного асинхронного двигателя $w^{(2)}_{СЕК}$.
Расчет выполним по выражению (3. 34):

$$w_{\text{сек}}^{(2)} = \frac{N\text{п}}{2} = \frac{54}{2} = 27 \text{ витков}$$

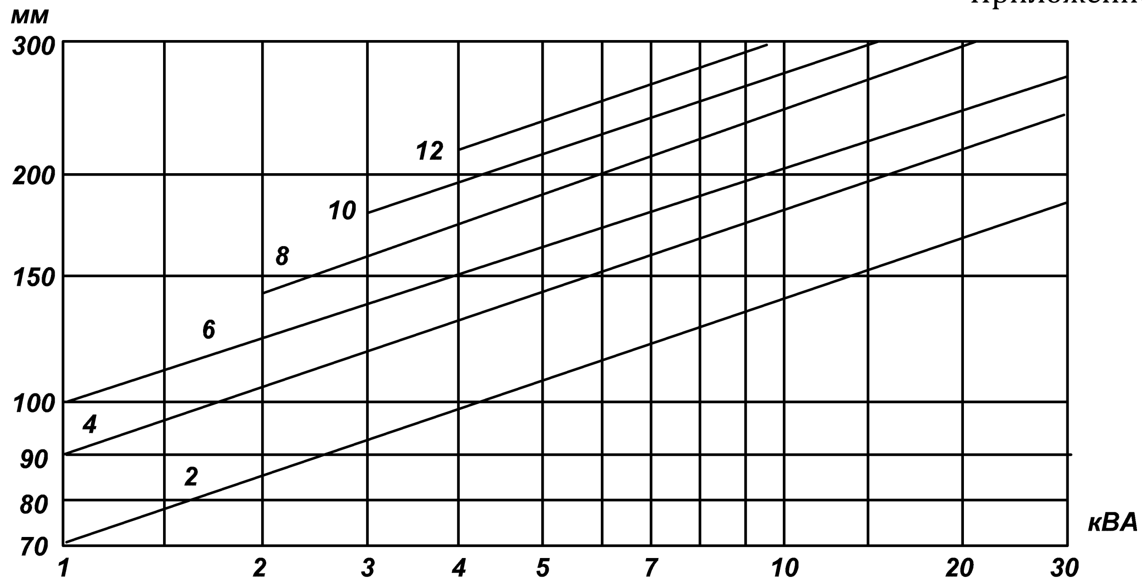
III – III. Индивидуальные задания к практической задаче №3.

Приложение 3. 1.

Вариант	Исходные данные к расчету											
	$U_Ф$, *в*	*n* *мин*$^{-1}$	*f* *гц*	*Z*	*D* *мм*	$Q\delta$, *м*^{2}	Q_Z, м^2	Q_C, *м*^{2}	*y'/y*	*q*	*α* эл. град	*a*	2*p*
1	220	1500	50	24	194	0,03050	0,017635	0,008873	6/5	2	30	1	4
2	220	1500	50	36	126	0,01237	0,005187	0,002115	9/7	3	20	1	4
3	220	1500	50	48	232	0,036442	0,01539	0,013337	12/10	4	15	1	4
4	220	3000	50	24	84	0,013194	0,004108	0,00185	12/10	4	15	1	2
5	220	1500	50	36	145	0,013096	0,006634	0,002425	9/7	3	20	1	4
6	220	1500	50	48	232	0,041908	0,017326	0,015015	12/10	4	15	1	4
7	220	1500	50	24	95	0,007461	0,002355	0,002966	6/5	2	30	1	4
8	220	3000	50	36	145	0,036442	0,018462	003374	18/14	6	10	1	2
9	220	750	50	48	185	0,01017	0,003926	0,002994	6/5	2	30	1	8
10	220	1500	50	24	95	0,009699	0,003127	0,002766	6/5	2	30	1	4
11	220	1000	50	36	84	0,00343	0,00141	0,000826	6/5	2	30	1	6
12	220	3000	50	48	185	0,052307	0,020626	0,003932	24/19	8	7,5	1	2
13	220	1500	50	24	ПО	0,010799	0,003541	0,003016	6/5	2	30	1	4
14	220	1000	50	36	84	0,00431	0,001772	0,001038	6/5	2	30	1	6
15	220	750	50	48	198	0,011274	0,004911	0,003357	6/5	2	30	1	8
16	220	3000	50	24	130	0,026546	0,011341	0,003828	12/10	4	15	1	2
17	220	3000	50	36	88	0,010781	0,004834	0,000616	18/14	6	10	1	2
18	220	750	50	48	197	0,015472	0,004956	0,003422	6/5	2	30	1	8
19	220	3000	50	24	54	0,004241	0,001587	0,000664	12/10	4	15	1	2
20	220	1500	50	36	95	0,007461	0,003199	0,001311	9/7	3	20	1	4
21	220	3000	50	24	54	0,00475	0,001778	0,000744	12/10	4	15	1	2
22	220	1500	50	36	100	0,017278	0,008155	0,001118	18/14	6	10	1	2
23	220	3000	50	24	61	0,002682	0,001214	0,000484	6/5	2	30	1	4
24	220	1500	50	36	105	0,008246	0,00392	0,001491	9/7	3	20	1	4
25	220	3000	50	24	54	0,005513	0,002063	0,000864	12/10	4	15	1	2

где, $U_Ф$ – фазное напряжение, *в*; *n* – частота вращения магнитного поля статора, *об. мин.*; *f* – частота тока, *гц*; *Z* – число зубцов магнитопровода, шт.; *D* – внутренний диаметр магнитопровода, *мм*.; $Q\delta$ – площадь полюса в воздушном зазоре, *м*^{2}; Q_Z – площадь полюса в зубцовой зоне, *м*^{2}; Q_C – площадь спинки магнитопровода статора, *м*^{2}; *y'/y* – полный/укороченный шаг обмотки; *q* – число пазов на полюс и фазу; α – число электрических градусов на один паз, эл. град.; *a* – число параллельных ветвей обмотки; 2*p* – число полюсов.


Приложение 3. 2.



Зависимость мощности асинхронного двигателя от внутреннего диаметра статора при разном количестве полюсов.

Средние значения коэффициентов мощности *cosφ* и *кпд* трехфазных асинхронных двигателей.

Таблица 3. 3.

Частота вращения, *мин*$^{-1}$	*кпд* η и *cosφ* при мощности, *кВт*		
	до 1	1–10	10–100
3000	$\frac{0,6-0,77}{0,7-0,87}$	$\frac{0,77-0,88}{0,87-0,90}$	$\frac{0,88-0,90}{0,90-0,92}$
1500	$\frac{0,57-0,72}{0,65-0,74}$	$\frac{0,75-0,86}{0,8-0,86}$	$\frac{0,87-0,92}{0,87-0,91}$
1000	$\frac{0,56-0,69}{0,62-0,72}$	$\frac{0,74-0,86}{0,74-0,82}$	$\frac{0,86-0,92}{0,86-0,89}$
750	$\frac{0,56-0,68}{0,60-0,62}$	$\frac{0,70-0,85}{0,68-0,75}$	$\frac{0,86-0,92}{0,80-0,85}$

Примечание. Большие значения *cosφ* и η берутся для больших мощностей АД: в числителе – η, в знаменателе – *cosφ*.

Тема 4.

Расчет номинальных данных асинхронного двигателя.

Цель: ознакомиться с номинальными данными электромашины и изучить методики их расчетов.

IV – I. Общие теоретические сведения по теме.

Номинальными данными называют оптимальные величины параметров, на которые рассчитана нормальная работа электрооборудования. Основные из них приводятся в паспорте (металлической пластине, прикреплённой к корпусу машины). У асинхронного двигателя к таким расчетным номинальным данным относятся следующие величины:

$U_{\text{Н}}$ – номинальное напряжение, *в*;
$I_{\text{Н}}$ – номинальный ток, *А*;
$P_{\text{Н}}$ – номинальная мощность, *квт*;
$f_{\text{Н}}$ – номинальная частота тока, *гц*;
$n_{\text{Н}}$ – номинальная частота вращения ротора, *мин* $^{-1}$;
$cos\varphi_{\text{Н}}$ – номинальный коэффициент мощности;
$\eta_{\text{Н}}$ – номинальный коэффициент полезного действия (*кпд*);
$\triangle/Y$ – схема соединения обмотки.

Оптимальность этих показателей связана с конструкцией электромашины, материалами из которых она изготовлена, условиями ее работы и другими показателями. Например, номинальная частота тока $f_{\text{Н}}$ в первую очередь связана с *эдс* одного витка (в соответствии с формулой 3. 13). Чем больше f тем выше $E_{1\text{В}}$, а, следовательно меньше $w\text{ф}$ (3. 14), т. е. больше мощность электродвигателя при тех же размерах. Но вместе с увеличением f увеличиваются потери в листах электротехнической стали, а значит нагрев машины. Вот почему номинальная частота $f_{\text{Н}}$ зависит от марки и толщины листов стали сердечника.
Номинальная частота вращения ротора $n_{\text{Н}}$ предопределена частотой вращения подвижных частей механизма электродвигателя, которые он приводит в действие. Номинальная схема соединения обмоток $\triangle/Y$ вытекает из требуемой величины напряжения, прилагаемой к фазной обмотке, а также условий пуска машины.
Номинальный коэффициент мощности $cos\varphi_{\text{Н}}$ определяется рациональным соотношением между составляющими (активной P и реактивной Q) полной мощности асинхронного двигателя S. Чем больше активная составляющая P, тем лучше, так как будут меньше потери в сети.
Номинальный коэффициент полезного действия $\eta_{\text{Н}}$ зависит от потерь в электрической машине (в основном в меди обмоток – $P_{\text{КЗ}}$ и стали магнитопровода – $P_{\text{ХХ}}$).
Номинальное напряжение $U_{\text{Н}}$ связано с электрической прочностью изоляции ($E_{\text{ПР}}$) машины. Причем, чем выше напряжение, тем больше должна быть прочность, а это связано с родом и толщиной используемых в изоляции составных диэлектриков, их $E_{\text{ПР}}$.
Номинальный ток $I_{\text{Н}}$ устанавливается нагревом изоляции, в первую очередь, за счет потерь в меди обмотки. Чем выше нагревостойкость изоляции и меньше потери, тем больше номинальный ток.
Номинальная мощность $P_{\text{Н}}$ является производной номинальных: тока, напряжения, коэффициентов мощности и полезного действия, а значит зависит от тех же показателей. Из выше приведенных величин $U_{\text{Н}}$, $f_{\text{Н}}$, $n_{\text{Н}}$, схема соединения обмотки машины заданы заказчиком (см. начало расчета).

4. 1. Номинальный ток.

Номинальный фазный ток двигателя равен произведению плотности тока на активную площадь обмоточного провода, с учетом параллельных ветвей и сечений, *А*:

$$I_{\text{НФ}} = J \times \Pi_{\text{ГОСТ}} \times a \times a' \quad (4.1)$$

где: J – плотность тока, $A/мм^2$; $\Pi_{\text{ГОСТ}}$ – фактическое сечение провода без изоляции, $мм^2$.

Плотность тока, как, и ток, в первую очередь, определяется допустимой температурой нагрева изоляции. Однако на скорость ее старения влияют также и многие другие факторы: способ пропитки обмоток, опыт работы обмотчика, охлаждение АД и др. Поэтому, при выборе j в таблицах справочников (табл. 4. 1), где она приводится в зависимости от типа обмоток и мощности двигателей в довольно широких пределах следует учитывать все параметры.

Чтобы не допустить существенной ошибки в выборе плотности тока, найденная по формуле (4. 2) величина фазного тока дополнительно проверяется по величине линейной нагрузки.
Линейная нагрузка двигателя представляет собой произведение тока на число активных проводников во всех пазах электромашины, приходящихся на 1 *м*. длины окружности внутренней расточки статора машины, $A/м$:

$$A = \frac{I_{НФ} \times N_{П} \times Z}{\pi \times D \times a} \quad (4.2)$$

где $N_{П}$ – число активных проводников в одном пазу, шт.; Z – количество пазов магнитопровода статора, шт.; D – внутренний диаметр расточки статора, *м*.
Результат вычисления линейной нагрузки сравнивается с допустимыми значениями, приведенными в таблицах. Если есть расхождение, то необходимо соответствующим образом изменить плотность тока в обмотке. В идеале оптимальной будет наибольшая возможная плотность тока, даже если она будет больше рекомендованной в таблице (при допустимой A), но вместе с тем следует учитывать сопутствующие факторы, состояние магнитопровода, пропитку обмотки и пр.

Таблица 4. 1

Нормированные плотности токов и линейных нагрузок асинхронных двигателей.

Наименование		мощность, *квт*		
		до 1	1...10	10...100
Плотность тока в обмотке статора (J) $A/мм^2$	*Одно*слойная	5,5 – 6,5	4,5 – 5	3,5 – 3,8
	*Двух*слойная	6 – 8	5,5 – 6	4–4,5
Допустимая линейная нагрузка (Aдоп) $A/м \times 10^{-3}$	*Одно*слойная	10,0 – 14,0	18,0 – 22,5	24,0 – 30,0
	*Двух*слойная	15,0 – 20,0	25,0 – 30,0	32,5 – 40,0

4. 2. Номинальная мощность.

Для расчета номинальной мощности вначале определяется полная мощность трехфазного асинхронного двигателя, которую он забирает из сети, *ква*:

$$S_{ДВ} = 3 \times I_{НФ} \times U_{НФ} \times 10^{-3} \quad (4.3)$$

где: $I_{НФ}$ – номинальный фазный ток, A; $U_{НФ}$ – номинальное фазное напряжение, *в*.
Полученная мощность в машине $S_{ДВ}$ идет на создание вращающегося магнитного поля, на потери и выполнение полезной работы. Однако реактивная составляющая этой мощности Q затрачиваемая на создание магнитного потока (величина практически постоянная для данного магнитопровода), как известно из курса электротехники, возвращается обратно в сеть. Это учитывается углом φ между полной мощностью и ее активной составляющей. Следовательно (рис. 50, треугольник мощностей), активная составляющая – P (ее называют еще присоединенной мощностью двигателя), затрачиваемая на все остальное, определяется из выражения, *квт*:

$$P_{ДВ} = 3 \times I_{НФ} \times U_{НФ} \times cos\varphi_{Н} \times 10^{-3} \quad (4.4)$$

где: $cos\varphi_{Н}$ – номинальный коэффициент мощности.
Расчетная номинальная мощность трехфазного асинхронного двигателя на валу (идущая на выполнение полезной работы) определяется по выражению, *кВт*:

$$P_{Н} = 3 \times I_{НФ} \times U_{НФ} \times cos\varphi_{Н} \times \eta_{Н} \times 10^{-3} \quad (4.5)$$

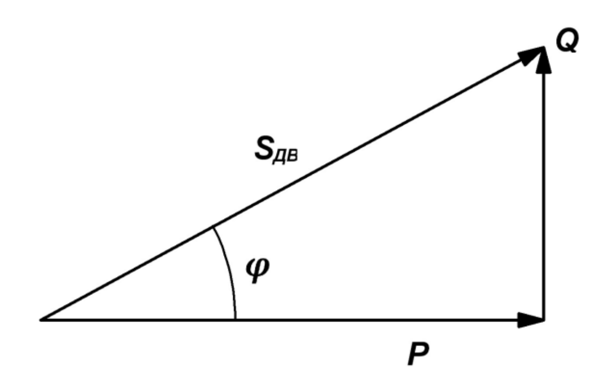


Рис. 4. 1. Сумма мощностей трехфазного АД.

где: η – номинальный коэффициент полезного действия, который учитывает все активные потери в электрической машине. Величины коэффициентов мощности $cos\varphi_{Н}$ и *кпд* $\eta_{Н}$ можно принять по каталожным данным двигателей, аналогичных рассчитываемому по типу, мощности и частоте вращения или по табл. 3. 3. Полученное значение мощности $P_{Н}$ округляется до ближайшего стандартного $P_{НГОСТ}$ и по известному выражению находится его номинальный ток $I_{НГОСТ}$.

$$I_{Н(ГОСТ)} = \frac{P_{Н} \times 10^3}{3 \times U_{НФ} \times cos\varphi \times \eta} \quad (4.6)$$

Последний еще раз проверяется по линейной нагрузке:

$$A = \frac{I_{НФгост} \times N_{П} \times Z}{\pi \times D \times a}$$

Если найденная линейная нагрузка удовлетворяет допустимой ($A_{ДОП}$), определяется фактическая плотность тока по формуле, $A/мм^2$:

$$J = \frac{I_{НФ(ГОСТ)}}{П_{ГОСТ} \times a \times nэ} \quad (4.7)$$

где $I_{НФ(ГОСТ)}$ – ток фазный, $П_{ГОСТ}$ – сечение провода, a – количество паралельныз ветвей в обмотке, $nэ$ – количество прводников в витке.

Примечание. В случае, когда магнитная система ремонтируемой машины не соответствует исходной номинальной частоте вращения ($n_{Н}$), на которую она была рассчитана, а, следовательно, нарушена согласованность площадей $Q\delta$, Q_Z, Q_C, проверку линейной нагрузки после определения J проводить нерационально, можно ограничится пределами допустимых плотностей тока (табл. 4. 1).

IV – II. Практическое использование теории в расчетах.

Задача: определить номинальную мощность трехфазного асинхронного двигателя с двухслойной обмоткой и изоляцией класса F, работающего в условиях повышенной температуры котельной, с расчетными параметрами: номинальное напряжение – 380/220 *в*; частота тока 50 *гц*; частота вращения (соответствует расчетной) – 1500; обмоточный провод – ПСД –2,0×2 $^{1,6}/_{1,89}$; число проводников в пазу – 12 шт.; число пазов магнитопровода – 48 шт.; внутренний диаметр расточки статора – 197 *мм*.; число параллельных ветвей – 1.

Решение. Количество пар полюсов (1. 3):

$$p = \frac{60 \times f}{n} = \frac{60 \times 50}{1500} = 2 \text{ шт.}$$

Приблизительная полная мощность асинхронного двигателя (при D = 197 *мм*. и числе пар полюсов p = 2, (см. приложение 3. 2.) $S_{ДВ}$ = 17 – 18 *ква*. С учетом cosφ и *кпд*, мощность P на валу будет в пределах 10 – 100 *квт*.
Номинальный ток двигателя (4. 1):

$$I_{НФ} = J \times П_{ГОСТ} \times a \times nэ = 6 \times 2 \times 1 \times 2 = 24\ A$$

где J принята равной 6 $A/мм^2$, так как обмотка АД двухслойная, его изоляция и обмоточного провода относится к классу F.
Линейная нагрузка при $I_{НФ}$ = 24 A по формуле (4. 2)

$$A = \frac{I_{НФ} \times N_П \times Z}{\pi \times D \times a} = \frac{24 \times 12 \times 48}{3{,}14 \times 0{,}197 \times 1} = 22347 \text{ А/м}$$

Так как расчетная линейная нагрузка (А = 22,35 × 10^3 А/м) меньше, чем допустимая (табл. 3. 1 – $А_{ДОП}$ = 25,0 – 30,0 × 10^3 $A/м$), принимаем плотность тока J = 7,5 $A/мм^2$, тогда номинальный ток машины будет:

$$I_{НФ} = J \times П_{ГОСТ} \times a \times nэ = 7{,}5 \times 2 \times 1 \times 2 = 30\ A$$

При этом линейная нагрузка:

$$A = \frac{I_{НФ} \times N_П \times Z}{\pi \times D \times a} = \frac{30 \times 12 \times 48}{3{,}14 \times 0{,}197 \times 1} = 27935 = 27{,}9 \times 10^3 \text{ А/м}$$

Отсюда, при номинальном токе $I_{НФ}$ = 30 А линейная нагрузка находится в пределах нормы $А_{ДОП}$. Полная мощность асинхронного двигателя (4. 3):

$$S_{ДВ} = 3 \times I_{НФ} \times U_{НФ} \times 10^{-3} = 3 \times 30 \times 220 \times 10^{-3} = 19{,}8 \text{ ква}$$

В табл.4. 1, для мощностей АД в пределах 10 – 100 *квт*, при числе оборотов магнитного поля в расточке статора 1500 $мин^{-1}$, коэффициент мощности (*cos*φ) можно принять равным 0,85, а *кпд* (η) = 0,85, тогда присоединенная мощность АД (4. 4):

$$P_{ДВ} = 3 \times I_{НФ} \times U_{НФ} \times cos\varphi \times 10^{-3} = 3 \times 30 \times 220 \times 0{,}85 \times 10^{-3} = 16{,}83 \text{ квт}$$

Расчетная номинальная мощность асинхронного двигателя $P'_Н$ (4. 5):

$$P_Н = 3 \times I_{НФ} \times U_{НФ} \times cos\varphi \times \eta \times 10^{-3} = 3 \times 30 \times 220 \times 0{,}85 \times 0{,}85 \times 10^{-3} = 14{,}3 \text{ квт}$$

Ближайшая стандартная номинальная мощность трехфазного асинхронного двигателя с расчетными параметрами (по справочнику) будет:

$P_Н$ = 15 *квт*; $U_{НФ}$ = 220 *в*; $n_Н$ = 1500 $мин^{-1}$; *cos*φ = 0,88; η = 0,885.

Номинальный ток (4. 6):

$$I_{Н(ГОСТ)} = \frac{P_Н \times 10^3}{3 \times U_{НФ} \times cos\varphi \times \eta} = \frac{15 \times 10^3}{3 \times 220 \times 0.88 \times 0.885} = 29.2\ A$$

Линейная нагрузка АД при $I_{Н}$ = 29,2 A:

$$A = \frac{I_{НФ} \times N_{П} \times Z}{\pi \times D \times a} = \frac{29{,}2 \times 12 \times 48}{3{,}14 \times 0{,}197 \times 1} = 27 \times 10^3\ \text{А/м}$$

Так как расчетная линейная нагрузка (A = 27,19 × 10^3 $A/м$) отвечает допустимой (табл. 3. 1 – $А_{доп}$ = 25,0 – 30 × 10^3 $A/м$), определяем фактическую плотность тока (4. 7):

$$J = \frac{I_{НФ(ГОСТ)}}{П_{ГОСТ} \times a \times nэ} = \frac{29{,}2}{2 \times 1 \times 2} = 7{,}3\ A/\text{мм}^2$$

IV – III. Индивидуальные задания к практической задаче №4.

Приложение 4. 1

вариант	D, *мм.*	Nп	n *мин*$^{-1}$	Z	$U_Ф$, *в*		$П_{ГОСТ}$ *мм*^{2}	a	nэ	$d_{ГОСТ}/d'_{ГОСТ}$	марка провода
1	208	8	3000	36	220/380	220	2,27	2	4	1,70/1,81	ПЭТ–155
2	158	20	1000	54	220/380	220	1,37	1	1	1,32/1,43	ПЭМ–2
3	185	16	1500	48	220/380	220	2,27	1	1	1,70/1,81	ПЭТ–155
4	100	114	750	36	220/380	220	0,18	1	1	0,48/0,55	ПЭВ–2
5	74	88	3000	24	220/380	220	0,28	1	1	0,59/0,66	ПЭМ–2
6	284	8	1000	72	380/660	380	2,83	1	4	1,9/2,02	ПЭТВ–155
7	113	76	750	36	220/380	220	0,35	1	1	0,65/0,75	ПЭВ–2
8	185	12	1500	48	220/380	220	2,83	1	2	1,90/2,02	ПЭТ–155
9	48	170	3000	24	220/380	220	0,03	1	1	0,20/0,24	ПЭВ–2
10	65	256	1000	36	220/380	220	0,04	1	1	0,22/0,26	ПЭМ–2
11	105	38	1500	36	220/380	220	0,78	1	1	1,00/1,09	ПЭТВ–2
12	158	40	750	48	220/380	220	0,78	1	1	1,00/1,09	ПЭТ–155
13	95	60	1500	36	220/380	220	0,32	1	1	0,64/0,72	ПЭМ–2
14	232	4	3000	48	220/380	220	3,53	2	4	2,12/2,24	ПЭТ–155
15	76	132	1000	36	220/380	220	0,1	1	1	0,35/0,42	ПЭМ–2
16	264	8	1500	48	380/660	380	1,91	2	4	1,56/1,67	ПЭТ–155
17	132	42	750	48	220/380	220	0,68	1	1	0,93/1,02	ПЭВ–2
18	70	166	1500	24	220/380	220	0,1	1	1	0,35/0,42	ПЭВ–2
19	194	12	3000	36	220/380	220	3,14	1	4	2,00/2,12	ПЭТ–155
20	100	74	1000	36	220/380	220	0,31	1	1	0,63/0,70	ПЭВ–2
21	211	14	1500	48	220/380	220	3,14	1	2	2,00/2,12	ПЭТ–155
22	197	54	1000	54	220/380	220	2,54	1	1	1,80/1,92	ПЭТ–155
23	61	260	1500	24	220/380	220	0,05	1	1	0,25/0,30	ПЭМ–2
24	130	26	3000	24	220/380	220	2,22	1	1	1,68/1,79	ПЭМ–2
25	113	56	1000	36	220/380	220	0,5	1	1	0,8/0,89	ПЭВ–2
26	238	8	1500	48	380/660	380	1,65	2	4	1,45/1,56	ПЭТ–155
27	55	380	750	24	220/380	220	0,04	1	1	0,2/0,24	ПЭВ–2
28	238	10	1500	48	380/660	380	2,54	1	4	1,80/1,92	ПЭТ–155
29	171	16	3000	36	220/380	220	3,53	1	2	2,12/2,24	ПЭТ–155
30	132	42	1000	54	220/380	220	0,64	1	1	0,85/0,93	ПЭТВ–2

все f = 50 *гц*

Раздел II.
Методические указания по темам расчета трансформатора.
Тема 5.
Обработка данных обмера магнитопровода трехфазного масляного трансформатора и определение его рациональной нагрузки.

Цель – Ознакомиться с методикой обмера магнитопровода трансформатора, изучить способы обработки полученных размеров до видов, упрощающих расчеты обмоток трехфазных масляных трансформаторов, изучить методику расчета оптимальной нагрузки магнитной цепи. Задачей обработки размеров магнитопровода является определение фактических площадей магнитной цепи трансформатора: стержней – $П_{ФС}$, ярм – $П_{ФЯ}$ и активных площадей: стержней – $П_С$, ярм – $П_Я$. Задачей расчета оптимальной нагрузки магнитной цепи является определение целесообразной магнитной индукции в сечениях магнитной цепи: стержнях – $B_С$ и ярмах $B_Я$.

V.– I. Общие теоретические сведения по теме.
5. 1. Обмер магнитопровода.

Расчет обмоток трехфазного трансформатора начинается с обмера его магнитопровода (рис. 5. 1., и рис. 5. 2.), который состоит из трех стержней (это те части, на которых размещаются фазные обмотки) и двух ярм (те части магнитопровода, которые соединяют стержни).

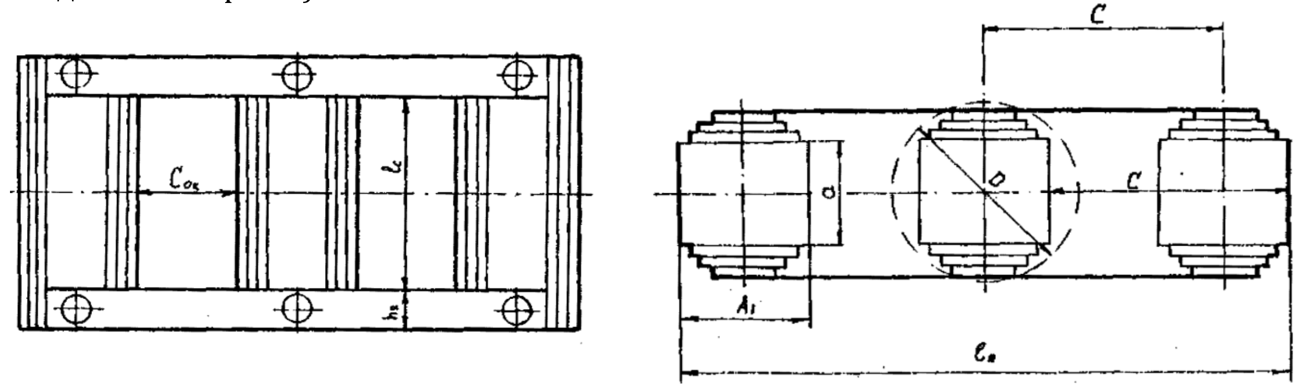
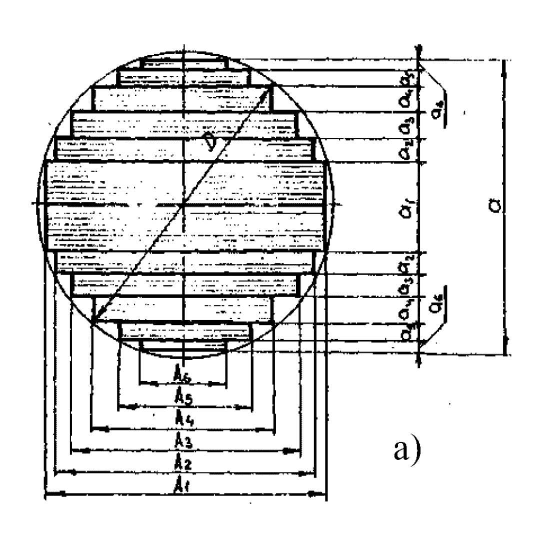


Рис. 5. 1. Магнитопровод трехфазного трансформатора.



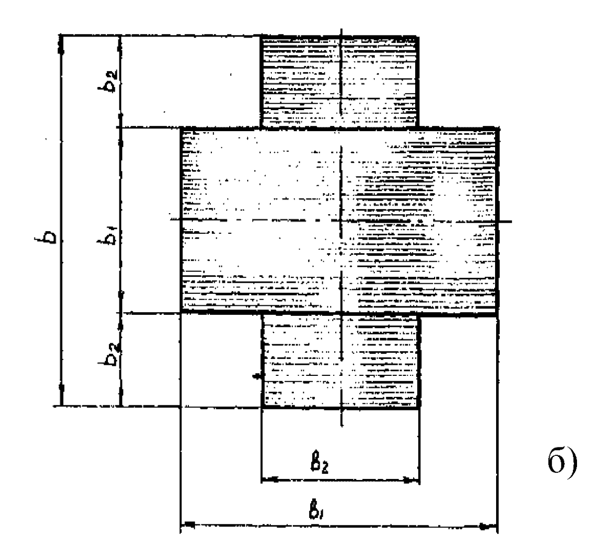


Рис. 5. 2. Сечения: *а*) стержня; *б*) ярма.

При измерении используются: линейки, рулетки, штангенциркули и другие измерительные приспособления. Измерению подлежат следующие размеры:

An –ширина пакетов (ступеней n = 1–…) стали стержней, *мм*.;
an – толщина пакетов (ступеней n = 1–…) стали стержней, *мм*.;
Bn – ширина пакетов (ступеней n = 1–…) стали ярм, *мм*.;
bn – толщина пакетов (ступеней n = 1–…) стали ярм, *мм*.;
δ – толщина листа электротехнической стали, *мм*.;
C – расстояние между осями стержней, *мм*.;
lc – высота стержня (окна магнитопровода), *мм*.;
Сок – ширина окна магнитопровода, *мм*.

Вместе с размерами магнитопровода трехфазного трансформатора для расчета его обмоток необходимы технические условия потребителя (заказчика), в которые входят:
$U_{\text{ВН}}$ – номинальное напряжение обмоток высшего напряжения, *кв*;
$U_{\text{НН}}$ – номинальное напряжение обмоток низшего напряжения, *кв*;
f – частота тока, *гц*;
– система охлаждения и условия работы трансформатора.
Система охлаждения в ремонтной практике обычно определяется конструкцией трансформатора, однако нередки случаи, когда заказчику необходима ее модернизация. Например, трансформатор с масляным охлаждением переделать на воздушное охлаждение. Условия работы требуется знать, например, при выборе схемы соединения обмоток.

5. 2. Подготовка данных обмера магнитопровода.

В целях упрощения расчетов обмоток трансформатора данные измерений его магнитопровода подвергаются математической обработке и по полученным размерам определяются:

5. 2. 1. Фактическая площадь стержня, *м*².

Всякая площадь это произведение длины на ширину, а так как площадь стержня $\Pi_{\text{ФС}}$ складывается из площадей отдельных пакетов *А*×*а*, формула расчета будет иметь вид:

$$\Pi_{\text{ФС}} = \text{A}_1 \times a_1 + 2\sum_{i=2}^{i=n} \text{A}_1 \times a_1 \quad (5.1)$$

5. 2. 2. Активная площадь стержня, *м*²

$$\Pi_{\text{С}} = kc \times \Pi_{\text{ФС}} \quad (5.2)$$

где *k*с – коэффициент заполнения пакета стали, учитывающий толщину ее изоляции, выбирается по справочникам в зависимости от толщины листа стали δ и толщины изоляции δ^*, но так как толщина изоляции нормирована ГОСТ для каждого ее рода, выбор *k*с выбирается по толщине листа стали и рода изоляции (см. табл. 5. 1).

Таблица 5. 1. Коэффициенты заполнения стали *k*с.

толщина листа стали 0,35 *мм*.	род изоляции	
	лак двукратный	нагревостойкая
	*k*с = 0,93	*k*с = 0,97

5. 2. 3. Фактическая площадь ярма, $м^2$.

Эта площадь определяется по тому же принципу, что и площадь стержня:

$$П_{ФЯ} = B_1 \times b_1 + 2\sum_{i=2}^{i=n} B_1 \times b_1 \quad (5.3)$$

5. 2. 4. Активная площадь ярма, $м^2$.

$$П_{Я} = kc \times П_{ФЯ} \quad (5.4)$$

5. 2. 5. Диаметр окружности описанной вокруг стержня , $м$.

$$Dc = \sqrt{A_1^2 + a^2} \quad (5.5)$$

5. 3. Определение оптимальной нагрузки магнитной цепи трансформатора.

Расчет рациональной нагрузки магнитопровода трансформатора требует знания схемы соединения его обмоток, номинальной мощности и токов.

5. 3. 1. Выбор схемы соединения обмоток трансформатора.

Выбор схемы соединения обмоток зависит от минимальных расходов на изготовление трансформатора и экономичных условий его работы в электрической сети. Из предусмотренных ГОСТ схем и групп соединения обмоток трехфазных двухобмоточных трансформаторов в сельских электрических сетях получили применение схемы приведенные в табл. 5. 2.

Таблица 5. 2. Схемы и группы соединения обмоток трехфазных двухобмоточных трансформаторов с естественным масляным охлаждением.

диаграммы векторов		условные обозначения	
высшего напряжения ВН	низшего напряжения НН	в чертежах	в тексте
		Y/△ – 11	У/Д – 11
		Y/Y – 0	У/Ун – 0
		Y/Y – 11	У/Zн – 11
		△/Y – 11	Д/Ун – 11
		Y/Y – 0	У/Ун – 0

Примечание: Схема соединения обмоток трансформатора Y/Yн СУ – 0 узаконена техническими условиями (ТУ) завода изготовителя. Она проверена на соответствие всем требованиям ГОСТ и серийно выпускается Минским электротехническим заводом им. В. И. Козлова. Для выбора целесообразной схемы соединения обмоток необходимо знать все их основные достоинства и недостатки.

Схема У/Д – 11.

Достоинства – относительно малый расход электротехнических материалов при изготовлении, простота технологии производства, а следовательно, малая стоимость аппаратов. При неравномерной нагрузке фаз дает сравнительно малое искажение системы фазных напряжений, дает возможность обеспечивать повышенную надежность работу электрической сети.
Недостатки – распределение и потребление электрической энергии выполняется при пониженном (фазном) напряжении, что вызывает повышенный расход проводов в линиях электропередач, а также создает повышенные потери электроэнергии, так как понижение напряжения до фазного вызывает рост тока до линейного ($S = UI = \text{const}$); – требует укорочения радиуса низковольтных линий, трансформаторы У/Д – 11 не могут работать параллельно или в кольце с трансформаторами У/Ун – 0 (разные группы), а последние в сетях имею доминирующее применение.

Схема У/Ун – 0.

Достоинства – минимальный расход электротехнических материалов при изготовлении, простота технологии производства трансформаторов, от сюда их минимальная стоимость, распределение электрической энергии выполняется на повышенном (линейном) напряжении, а вот потребление на пониженном (фазном). Обеспечивается относительно повышенный радиус низковольтных линий и понижение в них потерь электроэнергии, дает наименьшие по сравнению с другими трансформаторами потери короткого замыкания. Трансформаторы У/Ун – 0 просты в эксплуатации.
Недостатки – имеют высокую чувствительность к неравномерности нагрузки фаз, при этом резко искажается система фазных напряжений, что приводит к большим отклонениям напряжений на вводах у однофазных токоприемников и появлению поля обратной последовательности у трехфазных асинхронных двигателей, а также уравнительных токов в электрических линиях и при этом повышаются потери в электрической сети – в трансформаторах появляются потоки нулевой последовательности (Ф0), дополнительно нагревающие его бак и все ферромагнитные части, что нередко приводит к их пожарам, в лучшем случае к отказам при суммарной трехфазной нагрузке ниже номинальной мощност. К тому же при однофазных коротких замыканиях, когда Ф0 достигает больших значений, оно механически разрушает обмотки трансформатора, кроме того, поля обратной последовательности вызывают усиленный шум, что делает невозможным установку таких трансформаторов во встроенные в здания ТП. При работе трансформаторов У/Ун – 0 на нелинейные нагрузки (выпрямительные установки, дроссели и т. п.) резко искажается кривая изменения напряжения сети и значительно усложняется наладка работы защиты.

Схема У/Zн – 11.

Достоинства – практическое отсутствие искажения системы фазных напряжений при неравномерной нагрузке фаз, распределение электрической энергии выполняется на повышенном (линейном) напряжении, а потребление на пониженном (фазном).

Обеспечивается относительно повышенный радиус низковольтных линий и понижение в них потерь электроэнергии.
Недостатки – повышенный расход электротехнических материалов при изготовлении и относительно сложная технология производства трансформаторов, отсюда повышенная их стоимость. Большие потери короткого замыкания по сравнению с трансформаторами У/Ун – 0 и У/УнСУ – 0. Не могут работать ни в кольце ни в параллель с трансформаторами У/Ун – 0ю, так как имеют разные группы.

Схема Д/Ун – 11.

Достоинства – уменьшенное искажение системы фазных напряжений при неравномерной нагрузке фаз по сравнению с трансформаторами У/Ун–0. Распределение электрической энергии выполняется на повышенном (линейном) напряжении, а потребление на пониженном (фазном). Обеспечивается относительно повышенный радиус низковольтных линий и сравнительное понижение в них потерь электроэнергии.
Недостатки – повышенный расход электротехнических материалов при изготовлении и относительно сложная технология производства трансформаторов, отсюда повышенная их стоимость. Увеличенные потери короткого замыкания по сравнению с трансформаторами У/Ун–0 и У/Ун СУ–0. Не могут работать ни в кольце ни в параллель с трансформаторами У/Ун–0, так как имеют с ними разные группы.

Схема У/УнСУ – 0.

Достоинства – распределение электрической энергии выполняется на повышенном (линейном) напряжении, а вот потребление на пониженном (фазном). При этом обеспечивается относительно повышенный радиус низковольтных линий и понижение в них потерь электроэнергии; – дает такие же потери короткого замыкания, как трансформатор У/Ун – 0; – трансформаторы У/УнСУ – 0 просты и надежны в эксплуатации. – свободны от всех недостатков трансформаторов У/Ун – 0 при работе на несимметричную по фазам нагрузку. Недостатки – требуют большего расхода электротехнических ма–териалов на изготовление трансформаторов и несколько сложнее технология производства. Сравнение достоинств и недостатков схем соединения обмоток трансформаторов дает возможность сделать следующие выводы:

– при равномерной нагрузке фаз целесообразной схемой соединения обмоток трансформатора является самая экономичная из всех других – У/Ун – 0, так как ток в нулевом проводе (или иначе ток небаланса) – $I_{НБ}$ равный тройному значению тока нулевой последовательности ($3 \times I_0$) будет равен нулю, следовательно и напряжение нулевой последовательности будет равно нулю, так как $U_0 = I_0 \times Z_0$. А это, в свою очередь, не дает "смещения нулевой точки" векторов фазных напряжений и искажения системы этих напряжений не будет.
– при неравномерной нагрузке фаз I_0 не равно нулю (так как есть ток в нулевом проводе), тогда и напряжение $U_0 \neq 0$. Отсюда следует: для того чтобы напряжение нулевой последовательности равнялось нулю ($U_0 = I_0 \times Z_0$) и не было искажения системы векторов фазных напряжений надо, чтобы Z_0 (т. е. сопротивление нулевой последовательности трансформатора, пропорциональное Φ_0) равнялось нулю. Это возможно только при использовании схем соединения обмоток трансформаторов способных компенсировать потоки нулевой последовательности Φ_0 (У/Zн – 11 или У/Ун СУ – 0), либо таких схем которые его ослабляют (У/Д – 11, Д/Ун – 11). Значит, при неравномерной загрузке фаз целесообразными являются указанные схемы.

5. 3. 2. Расчет номинальной мощности и токов обмоток трансформатора.

Расчет номинальной мощности. В трансформаторе, как и в электрических машинах, работа выполняется магнитным полем, а так как сталь магнитопровода обладает насыщением, величина мощности зависит от минимальной площади в случае по диаметру окружности (D), описанному вокруг стержня, магнитной цепи. Исходя из сказанного, номинальная мощность ($S_{Н}$) трансформатора определяется по геометрическим размерам сердечника. Для этого вначале по империческому выражению находится приближенная мощность $S_{ТР}$:

$$S_{ТР} = 3 \times \left(\frac{100 \times D}{K}\right)^4 \quad (5.6)$$

где K – коэффициент, зависящий от мощности трансформатора и марки электротехнической стали. При холоднокатанной стали и мощности трансформаторов от 25 до 650 *ква* он принимается в пределах от 5 до 5,3.

По полученному значению мощности $S_{ТР}$ в берется ближайшая (стандартная) номинальная мощность трансформатора $S_{Н}$ и для нее из таблицы выписываются все расчетные параметры указаниях с учетом выбранной схемы соединения обмоток: потери холостого хода P_{XX}, потери короткого замыкания $P_{КЗ}$, напряжение короткого замыкания U_{XX}, ток холостого хода I_{XX} (в методических указаниях они приведены в табл. 5. 3). В заключение выписываются допустимые ГОСТом отклонения этих характеристик, приведенные в табл. 5. 4.

Таблица 5. 3.

Расчетные данные трехфазных трансформаторов с естественным масляным охлаждением, установленные ГОСТ для номинальных мощностей 25…630 *ква*.

Номинальная мощность трансформатора, $S_{Н}$. *ква.*	Номинальное напряжение обмотки высшего напряжения (ВН), $U_{Н}$, *кв.*	Потери, *вт*			Напряжение короткого замыкания. $U_{КЗ}$, %		Ток холостого хода, I_{XX}, %
		Холостого хода, P_{XX}	Короткого замыкания, $P_{КЗ}$				
			Схема У/Ун	Схема У/Zн	У/Ун	У/Zн	
25	6, 10	130	600	690	4,5	4,7	3,2
40	6, 10	175	680	1000	4,5	4,7	3,0
63	6, 10	240	1280	1470	4,5	4,7	2,8
	20, 35	270	1280	1470	5,0	5,3	2,8
100	6, 10	330	1970	2270	4,5	4,7	2,6
	20, 35	420	1970	2270	6,5	6,8	2,6
160	6, 10	510	2650	3100	4,5	4,7	2,4
	20, 35	620	2650	3100	4,5	4,7	2,4
250	6, 10	740	3700	4200	4,5	4,7	2,3
	20, 35	900	3700	4200	6,5	6,8	2,3
400	6, 10	950	5500	5900	4,5	4,7	2,1
	20, 35	1200	5500		6,5		2,1
630	6, 10	1310	7600	8500	5,5	5,5	2,0
	20, 35	1600	7600		6,5		2,0

Таблица 5. 4.

Допустимые отклонения характеристик.

Потери холостого хода	Потери короткого замыкания	Суммарные потери	Ток холостого хода	Напряжение короткого замыкания	Коэффициент трансформации
+ 15%	+ 10%	+ 10%	+ 30%	± 10%	±0,5

Расчет номинальных токов обмоток. Они определяются из известной формулы мощности ($S_{\text{Н}}$), *А*:

$$I_{\text{Н(ВН или НН)}} = \frac{S_{\text{Н}}}{\sqrt{3} \times U_{\text{Н(ВН или НН)}}} \quad (5.7)$$

где $I_{\text{Н(ВН)}}$ – номинальный ток, соответственно обмоток высшего напряжения (ВН) и обмоток низшего напряжения (НН), *кв*; $U_{\text{Н(ВН)}}$ – номинальное напряжение, соответственно обмоток высшего напряжения (ВН) и обмоток низшего напряжения (НН), *кв*.

5. 3. 3. Расчет оптимальной величины магнитной индукции (нагрузки) в магнитной цепи трансформатора.

Рациональная магнитная индукция *В* или иначе плотность магнитного потока в сердечнике зависит от установленных ГОСТ для данного трансформатора потерь $P_{\text{ХХ}}$ и тока $I_{\text{ХХ}}$. Для определения оптимальной индукции расчеты выполняются в следующем порядке: На первом этапе пользуются рекомендациями производства и принимают в стержнях предварительную величину индукции $B_{\text{С}}$ по табл. 5. 5., в зависимости от марки стали и номинальной мощности трансформатора.

Таблица 5. 5. Рекомендуемые величины магнитных индукций, *Тл*.

марка стали	мощность трансформатора $S_{\text{Н}}$, *ква*.	
	25 – 100	160 и выше
1512, 1513	1,5 – 1,55	1,55 – 1,6
3404, 3405	1,55 – 1,6	1,6 – 1,65

Для выбранной величины магнитной индукции в стрежнях $B_{\text{С}}$, так как магнитный поток ($\Phi = B \times \text{П}$) на всех участках магнитной цепи один и тот же, величина магнитной индукции в ярмах будет равна, *Тл*.:

$$B_{\text{Я}} = B_C \times \frac{\text{П}_{\text{С}}}{\text{П}_{\text{Я}}} \quad (5.8)$$

На втором этапе проводится проверка принятой магнитной индукции по $P_{\text{ХХ(ГОСТ)}}$ и $I_{\text{ХХ(ГОСТ)}}$) для принятой $S_{\text{Н}}$ трансформатора, так как завышенная магнитная индукция приводит к перегреву магнитопровода трансформатора и увеличенному току холостого хода, а заниженная *В* – к перерасходу обмоточных проводов, к сложностям при размещения обмоток в окне магнитопровода. Проверка магнитной индукции по потерям холостого хода. В ремонтной практике для расчета потерь в магнитной системе трансформатора пользуются формулой, *вт*:

$$P_{\text{ХХ}} = k_{\text{Д}} \times (pс \times Gс + pя \times Gя) \quad (5.9)$$

где $k_Д$ – коэффициент добавочных потерь. Для горячекатаных сталей принимается равным 1,0…1,1: для холоднокатаных – 1,25, pc , $pя$ – удельные потери в одном *кг* стали, соответственно, стержня и ярма, *вт/кг*. Берутся по таблицам ГОСТ на электротехническую сталь, в зависимости от марки стали толщины ее листа δ *мм.*, частоты тока f *гц*, величины магнитной индукции (в стержнях $B_С$ и в ярмах $B_Я$), *Тл*. В частности они приведены в табл. 5. 6. Gc, $Gя$ – масса стали, соответственно, трех стержней и двух ярм, *кг*.

$$Gc = m \times Y \times \Pi_C \times lc \qquad Gя = n \times Y \times \Pi_C \times lя \quad (5.10)$$

где Y – плотность электротехнической стали, *кг/м*[3]. Для трансформаторной стали: Y = 7650 *кг/м*[3]; lc – длина (высота) стержня, *м.*, m – число стержней магнитопровода, шт; n – число ярм магнитопровода, *м.*, $lя$ – полная длина ярма, *м*. Для трехстержневого магнитопровода:

$$lя = 2 \times C + A_1 \quad (5.11)$$

где C – расстояние между осями стержней, м., A_1 – ширина большого пакета стержня, *м*.

Таблица 5. 6. Удельные потери в стали p *вт/кг* для горячекатаной и холоднокатаной стали, с толщиной листа δ = 0,5 *мм.*, при частоте f = 50 *гц* в зависимости от величины магнитной индукции, *Вс*, *Тл*.

Вс, *Тл.*	Горячекатаная сталь		Холоднокатаная сталь	
	1512	1513	3404	3405
0,90	0,962	0,836	0,397	0,302
1,00	1,200	1,050	0,475	0,425
1,10	1,460	1,290	0,575	0,505
1,20	1,760	1,560	0,675	0,610
1,30	2,090	1,850	0,785	0,715
1,32	–	–	0,814	0,739
1,34	–	–	0,843	0,763
1,36	–	–	0,872	0,787
1,38	–	–	0,901	0,811
1,40	2,450	2,170	0,930	0,835
1,42	–	–	0,964	0,860
1,44	–	–	0,998	0,869
1,46	–	–	1,032	0,916
1,48	–	–	1,066	0,943
1,50	2,800	2,500	1,100	0,970
1,52	–	–	1,134	1,004
1,54	–	–	1,168	1,038
1,56	–	–	1,207	1,074
1,58	–	–	1,251	1,112
1,60	–	–	1,295	1,150
1,62	–	–	1,353	1,194
1,64	–	–	1,411	1,238
1,66	–	–	1,472	1,288
1,68	–	–	1,536	1,344
1,70	–	–	1,600	1,400

Полученная по выражению (5. 9) величина потерь холостого хода P_{XX} сравнивается с допустимой по ГОСТ $P_{XX(ГОСТ)}$, табл. 5. 3, при этом:

$$1{,}15 \times P_{XX(ГОСТ)} \geq P_{XX} \geq P_{XX(ГОСТ)}$$

Если условие не соблюдается расчет P_{XX} следует повторить изменив в нужную сторону величину магнитной индукции (*Вс*, *Тл.*). При большой P_{XX} (*Вс*, *Тл.*) следует уменьшить, при малой P_{XX} (*Вс, Тл.*) следует увеличить.
Примечание. Использование формулы (5. 9) для расчета P_{XX} при мощностях трансформаторов более 250 *ква*, если магнитопровод выполнен из холоднокатаной стали, иногда дает относительно повышенную ошибку, в этом случае целесообразно расчет P_{XX} выполнять по более точной методике (см. [2]).

Проверка магнитной индукции по току холостого хода.

Ток I_{XX} холостого хода складывается из активной $I_{XX(A)}$ и реактивной $I_{XX(P)}$ составляющих. Активная составляющая тока находится по формуле:

$$I_{XX(A)} = \frac{P_{XX}}{m \times U_{\Phi(BH)}} \quad (5.12)$$

где $U_{\Phi(BH)}$ – фазное напряжение обмотки высшей стороны трансформатора, *в*.
Реактивная составляющая находится из выражения:

$$I_{XX(P)} = \frac{Q_{XX}}{m \times U_{\Phi(BH)}} \quad (5.13)$$

где Q_{XX} – полная намагничивающая (реактивная) мощность трансформатора, *ва.* В ремонтной практике с достаточной точностью полная намагничивающая мощность Q_{XX} находится по формуле, *ва*:

$$Q_{XX} = k \times \left((qс \times Gс + qя \times Gя) + Q_з\right) \quad (5.14)$$

где k – коэффициент, учитывающий марку стали: для горячекатаных сталей k = 1,0; для холоднокатаных – k = 1,25, $qс$ и $qя$ – удельные намагничивающие мощности для одного *кг* стали стержней и ярм, *ва*. Берутся по таблицам ГОСТ на электротехническую сталь в зависимости от марки стали, толщины листа δ *мм*., частоты тока *f*, величины магнитной индукции (для стержней *Вс* и для ярм *Вя*). В частности они приведены в табл. 5. 7. Qз – намагничивающая мощность зазоров, *ва*, которая может быть, с достаточной точностью, определена по формуле, *ва*:

$$Qз = 3{,}2 \times qз \times П_{ФС} \quad (5.15)$$

где qз – удельная намагничивающая мощность зазоров, $ва/м^2$, значения которого также берутся по таблицам (например, табл. 5. 7). Суммарная величина тока холостого хода определяется из выражения:

$$I_{XX} = \sqrt{I^2_{XX(a)} + I^2_{XX(р)}} \quad (5.16)$$

Полученная величина сравнивается с номинальным током трансформатора ($I_Н$), точнее, находим отношение тока холостого хода к номинальному в %:

$$I_{XX}\% = \frac{I_{XX}}{I_Н} \times 100 \quad (5.17)$$

Полученную величину $I_{XX\%}$ сравнивают с допустимой величиной $I_{XX\%}$ (гост) по табл. 5. 3. Она должна быть в пределах:

$$1{,}3 \times I_{XX}\%(ГОСТ) \geq I_{XX} \geq I_{XX}\%(ГОСТ)$$

Завышенный ток холостого хода требует понижения рабочей составляющей тока трансформатора, так как номинальный ток не может быть выше указанного в паспорте (при данной номинальной мощности), следовательно, для понижения тока холостого хода необходимо понижение магнитной индукции (*Вс*) и повторный расчет I_{XX}.

Таблица 5. 7. Удельная намагничивающая мощность в стали *q вт/кг* для горячекатаной и холоднокатаной стали, с толщиной листа δ = 0,5 *мм*., при частоте *f* = 50 *гц* в зависимости от величины магнитной индукции *Вс*, *Тл*.

Вс, *Тл*,	Горячекатаная сталь		Холоднокатаная сталь			
	qс, ва/кг	*qз, ва/кг*	*qс, ва/кг*		*qз, ва/кг*	
	1512 – 1513	1512 – 1513	3404	3405	3404	3405
0,90	3,500	3030	0,460	0,450	640	590
1,00	4,600	4910	0,548	0,533	1000	900
1,10	6,500	7760	0,650	0,630	2500	2300
1,20	10,000	11760	0,752	0,732	4000	3700
1,30	15,700	17220	0,900	0,860	7400	6000
1,32	–	–	0,932	0,892	8200	6640
1,34	–	–	0,964	0,924	9000	7280
1,36	–	–	0,996	0,956	9800	7920
1,38	–	–	1,028	0,988	10600	8560
1,40	25,800	24570	1,060	1,020	11400	9200
1,42	–	–	1,114	1,065	12440	10120
1,44	–	–	1,168	1,110	13480	11040
1,46	–	–	1,222	1,156	14520	11960
1,48	–	–	1,276	1,210	15560	12880
1,50	43,500	34200	1,330	1,246	16600	13800
1,52	–	–	1,408	1,311	17960	14760
1,54	–	–	1,486	1,376	19320	15720
1,56	–	–	1,576	1,447	20700	16800
1,58	–	–	1,675	1,524	22100	18000
1,60	–	–	1,775	1,602	23500	19200
1,62	–	–	1,985	1,748	25100	20480
1,64	–	–	2,131	1,894	26700	21760
1,66	–	–	2,556	2,123	28600	23160
1,68	–	–	3,028	2,435	30800	24680
1,70	–	–	3,400	2,747	33000	27000

V – II. Практическое использование теории в расчетах.

Задача: обработать данные обмера магнитопровода (табл. 5. 8) трехфазного трансформатора с естественным масляным охлаждением: определить площади фактического и активного сечения стержня и ярма – $П_{ФС}$, $П_{ФЯ}$, $П_{С}$, $П_{Я}$, диаметр описанной окружности вокруг стержня – *Dс*; выбрать оптимальную магнитную нагрузку магнитной цепи – *Вс*.

Таблица 5. 8. Параметры данного магнитопровода трансформатора
и условия заказчика.

Данные магнитопровода, размеры в *мм*.																	
C	*lc*	*Cок*	A1	A2	A3	A4	A5	a1	a2	a3	a4	a5	B1	в1	δ	Марка стали	Изоляция
250	360	155	95	85	75	55	40	31	11	7	7	4	85	89	0,35	3404	Лак 2х кратый

Условия заказчика					
Uвн, кв	*Uнн, кв*	Схема группа	Пределы △/Y, %	Охлаждение	Условия работы
10	0,4	У/Ун	2х2,5	ТМ	Коммунально – бытовой.

Решение.
1. Подготовка данных обмера магнитопровода.
1. 1. Фактическая площадь стержня определяется из выражения (5. 1)

$$\Pi_{\text{ФС}} = A_1 \times a_1 + 2\sum_{i=2}^{i=n} A_1 \times a_1 =$$

$$= 0{,}095 \times 0{,}031 + 2 \times (0{,}085 \times 0{,}011 + 0{,}075 \times 0{,}007 + 0{,}055 \times 0{,}007 + +0{,}04 \times 0{,}004) =$$

$$= 0{,}0069 \text{ м}^2$$

1. 2. Активная площадь стержня находится по формуле (5.2). Из табл. 5. 1, при толщине листов стали магнитопровода δ = 0,35 *мм.* и изоляции их двухкратным слоем лака коэффициент заполнения стали (kc) равен 0,93, отсюда получим:

$$\Pi_{\text{С}} = k\text{с} \times \Pi_{\text{ФС}} = 0{,}93 \times 0{,}0069 = 0{,}0065 \text{ м}^2$$

1. 3. Фактическая площадь ярма, рассчитывается по выражению (5. 3):

$$\Pi_{\text{ФЯ}} = B_1 \times b_1 + 2\sum_{i=2}^{i=n} B_1 \times b_1 = 0{,}085 \times 0{,}089 = 0{,}0076 \text{ м}^2$$

1. 4. Активную площадь ярма находим по формуле (5. 4). Учитывая, что коэффициент заполнения стали тот же и равен 0,93 (табл. 5. 1) получим:

$$\Pi_{\text{Я}} = k\text{с} \times \Pi_{\text{ФЯ}} = 0{,}93 \times 0{,}0076 = 0{,}0071 \text{ м}^2$$

1. 5. Диаметр окружности описанной вокруг стержня рассчитываем по закону Пифагора (5. 5):

$$Dc = \sqrt{A_1^2 + a^2} = \sqrt{0{,}095^2 + 0{,}031^2} = 0{,}1 \text{ м.}$$

2. 1. Выбор схемы соединения обмоток трансформатора.

Принимая во внимание, что ремонтируемый трансформатор будет питать, в основном, симметричные трехфазные нагрузки асинхронных двигателей мастерских, а следовательно ток в нулевом проводе практически будет отсутствовать, наиболее целесообразной схемой соединения его обмоток является самая дешевая – $\text{У}/\text{У}_{\text{Н}}$.

Так как при $I_0 = 0$ "смещение нулевой точки" векторов фазных напряжений не будет иметь место ($U_0 = I_0 \times Z_0$).

2. 2. Расчет номинальной мощности.

Для определения воспользуемся экспериментальной формулой (5. 6) связи между диаметром описанной окружности вокруг стержня трансформатора и допустимой величиной магнитного потока, а следовательно и мощностью которую можно получить от данного магнитопровода, ($S_{ТР}$).

$$S_{ТР} = 3 \times \left(\frac{100 \times D}{K}\right)^4$$

Принимая во внимание, что магнитопровод нашего трансформатора выполнен из холоднокатаной стали (3404), а при найденном диаметре Dc мощность не может быть большой, коэффициент K берем равным 5, отсюда предварительная мощность:

$$S_{ТР} = 3 \times \left(\frac{100 \times 0{,}1}{5}\right)^4 = 48 \text{ ква}$$

По ГОСТ на ряды номинальных мощностей силовых трансформаторов ближайшая номинальная мощность равна:

$$S_{Н} = 40 \textit{ ква}$$

Так как по условию ремонта система охлаждения трансформатора не подлежит модернизации, из таблицы ГОСТ выписываем расчетные номинальные параметры стандартного трансформатора ТМ40–10/04, У/Ун (табл. 5. 9) и по табл. 5. 4 берем допустимые отклонения характеристик.

Таблица 5. 9.

Расчетные параметры трансформатора ТМ40 – 10/04

Номинальная мощность трансформатора $S_Н$, *ква*	Номинальное напряжение обмотки высшего напряжения (ВН) $U_Н$, *кв*	потери, *вт*		Напряжение короткого замыкания $U_{КЗ}$, %	Ток холостого хода $I_{ХХ}$, %
		Холостого хода $I_{ХХ}$, *вт*	Короткого замыкания $P_{КЗ}$, *вт*		
40	10	175	680	4,5	3,0

2. 3. Расчет номинальных токов обмоток.

Они определяются из известной формулы мощности (5. 7).

Обмотка высшего напряжения:

$$I_{Н(ВН)} = \frac{S_Н}{\sqrt{3} \times U_{Н(ВН)}} = \frac{40}{\sqrt{3} \times 10} = 2{,}3\ A$$

Обмотка низшего напряжения:

$$I_{Н(НН)} = \frac{S_Н}{\sqrt{3} \times U_{Н(НН)}} = \frac{40}{\sqrt{3} \times 0{,}4} = 57{,}8\ A$$

2. 4. Расчет рациональной магнитной индукции (B) или иначе плотности магнитного потока в сердечнике трансформатора.

2. 4. 1. По табл. 5. 5 принимаем рекомендованную практикой для марки стали 3404 и мощности трансформатора 40 *ква* предварительную величину индукции (Bc) равной 1,58 *Тл*. Следовательно, величина магнитной индукции в ярмах будет равна:

$$B\text{я} = B\text{c} \times \frac{\Pi_{\text{С}}}{\Pi_{\text{Я}}} = 1{,}58 \times \frac{0{,}0065}{0{,}0071} = 1{,}45 \text{ Тл.}$$

2. 4. 2. Выполним проверку принятой магнитной индукции для выбранного трансформатора по величине потерь холостого хода $P_{\text{ХХ(ГОСТ)}}$ для этого определим по формулам:
– массу стержней магнитопровода:

$$G_{\text{С}} = m \times Y \times \Pi_{\text{С}} \times lc = 3 \times 7650 \times 0{,}0065 \times 0{,}36 = 53{,}7 \text{ кг}$$

– полную длину ярма магнитопровода:

$$l\text{я} = 2 \times \text{С} + \text{А}_1 = 2 \times 0{,}25 + 0{,}095 = 0{,}595 \text{ м.}$$

– массу ярм магнитопровода:

$$G\text{я} = n \times Y \times \Pi_{\text{Я}} \times l\text{я} = 2 \times 7650 \times 0{,}0071 \times 0{,}595 = 64{,}6 \text{ кг}$$

– потери холостого хода (5. 9) – для этого по табл. 5. 7 при марке стали 3404 и Bc = 1,58 Тл. берем удельные потери стержней pc = 1,251 *вт/кг* и удельные потери ярм при $Bя$ = 1,45 *Тл.* – $pя$ = 1,0 *ва/кг*.

$$P_{\text{ХХ}} = k_{\text{Д}} \times (pc \times Gc + p\text{я} \times G\text{я}) = 1{,}25 \times (1{,}251 \times 53{,}7 + 1{,}0 \times 64{,}6) = 164{,}8 \text{ вт}$$

По условию найденная величина потерь холостого хода $P_{\text{ХХ}}$ не должна быть менее $P_{\text{ХХ(ГОСТ)}}$ и не должна быть больше 1,15 × $P_{\text{ХХ(ГОСТ)}}$, следовательно, так как 164,8 вт > 175 *вт* (см. табл. 5. 9) величину магнитной индукции следует увеличить. Принимаем Bc = 1,64 *Тл*. (тогда $Bя$ = 1,5 *Тл*.)

$$P_{\text{ХХ}} = k_{\text{Д}} \times (pc \times Gc + p\text{я} > G\text{я}\ ) = 1{,}25 \times (1{,}411 \times 53{,}7 + 1{,}1 \times 64{,}6) = 183{,}5 \text{ вт}$$

Так как последние магнитные индукции удовлетворяют условию 1,15×$P_{\text{ХХ(ГОСТ)}}$ ≥ Pхх ≥ ▯ $P_{\text{ХХ(ГОСТ)}}$ (183,5 *вт* больше 175 *вт*, но меньше чем 1,15 × 175 = 201,25 *вт*), т. е. Bс = 1,64 Тл и $Bя$ = 1,5 *Тл*. – принимаем к дальнейшему расчету.

2. 4. 3. Выполним проверку принятой магнитной индукции для рассчитываемого трансформатора по величине тока холостого хода $I_{\text{ХХ(ГОСТ)}}$, для этого определим по формулам:
– активную составляющую тока (5. 12):

$$I_{\text{ХХ(А)}} = \frac{P_{\text{ХХ}}}{m \times U_{\text{Ф(ВН)}}} = \frac{183{,}5}{3 \times 5780} = 0{,}01\ A$$

– намагничивающую мощность зазоров (5. 15), для этого по табл. 5. 7 при Bc = 1,64 *Тл.* и марке стали 3404 берем удельную намагничивающую мощность зазоров qз = 26700 *ва/м*^{2}:

$$Q\text{з} = 3{,}2 \times q\text{з} \times \Pi_{\Phi C} = 3{,}2 \times 26700 \times 0{,}0069 = 589{,}5 \text{ ва}$$

– полную намагничивающую мощность (5. 14) для этого по табл. 5. 7 при марке стали 3404 и *Bс* = 1,64 *Тл.* берем удельную намагничивающую мощность стержней *q*с = 2,131 *ва*/*кг* и удельную намагничивающую мощность ярм при *Bя* = 1,5 *Тл.* – *q*я = 1,330 *ва*/*кг*:

$$Q_{\text{XX}} = k \times \left((q\text{с} \times G\text{с} + q\text{я} \times G\text{я}) + Q\text{з}\right) = 1{,}25 \times \left((2{,}131 \times 53{,}7 + 1{,}330 \times 64{,}6) + 589{,}5\right) = 987{,}3 \text{ ва}$$

– реактивная составляющая находится из выражения (5. 13):

$$I_{\text{XX(P)}} = \frac{Q_{\text{XX}}}{m \times U_{\Phi(\text{BH})}} = \frac{987{,}3}{3 \times 5780} = 0{,}06\ A$$

– суммарная величина тока холостого хода определяется в А из выражения (5. 16):

$$I_{\text{XX}} = \sqrt{I^2_{\text{XX}(a)} + I^2_{\text{XX(p)}}} = \sqrt{0{,}01^2 + 0{,}06^2} = 0{,}061\ A$$

– то же в процентах от номинального тока трансформатора по формуле (5. 17):

$$I_{\text{XX}}\% = \frac{I_{\text{XX}}}{I_{\text{H}}} \times 100 = \frac{0{,}061}{2{,}3} \times 100 = 2{,}65\%$$

Полученную величину I_{XX} % сравниваем с допустимой величиной $I_{\text{XX\%(ГОСТ)}}$ по табл. 5. 9, так как она удовлетворяют условию 1,3 × $I_{\text{XX\%(ГОСТ)}} \geq I_{\text{XX}} \geq I_{\text{XX\%(ГОСТ)}}$ (1,3 × 3 = 3,9% больше 2,65%, и даже меньше 3%), то магнитные нагрузки *Bс* = 1,64 Тл и *Bя* = 1,5 *Тл.* можно принять к дальнейшему расчету и по этому показателю.

Примечание: Завышенный ток холостого хода требует понижения рабочей составляющей тока трансформатора, следовательно, чем ток холостого хода меньше, тем лучше.

Приложение 5.

V – III. Индивидуальные задания к практической задаче №5.

вариант	c	1c	Сок	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	B1	B2	B3	b1	b2	b3	*U*вн *кв*
1	490	985	295	195	175	155	135	105	85	55	46	26	15	10	11	6	5	195	175	135	46	26	47	20
2	490	985	295	195	175	155	135	105	85	55	46	26	15	10	11	6	5	195	175	135	46	26	47	35
3	490	985	295	195	175	155	135	105	85	55	46	26	15	10	11	6	5	195	175	135	46	26	47	35
4	325	624	210	115	105	95	75	55	40	–	34	12	8	9	6	2	–	115	95	–	58	25	–	20
5	400	765	245	155	135	120	105	85	55	–	40	23	10	8	7	7	–	155	135	105	40	23	32	10
6	325	624	210	115	105	95	75	55	40	–	34	12	8	9	6	2	–	115	95	–	58	25	–	35
7	400	765	245	155	135	120	105	85	55	–	40	23	10	8	7	7	–	155	135	105	40	23	32	20
8	307	520	172	135	105	120	85	65	40	–	38	17	11	9	6	5	–	135	120	85	38	17	31	10
9	400	765	245	155	135	120	105	85	55	–	40	23	10	8	7	7	–	155	135	105	40	23	32	35
10	375	745	240	135	120	105	95	75	55	–	36	18	10	5	8	5	–	135	105	–	38	46	–	35
11	330	555	175	155	135	120	105	85	55	–	40	23	10	7	7	7	–	155	135	105	40	23	31	6
12	330	555	175	155	135	120	105	85	55	–	40	23	10	7	7	7	–	155	135	105	40	23	31	10
13	400	765	245	155	135	120	105	85	55	–	40	23	10	8	7	7	–	155	135	105	40	23	32	20
14	360	625	185	175	155	135	105	85	55	–	42	25	14	13	5	6	–	175	135	–	92	38	–	10
15	420	723	215	195	175	155	120	96	65	55	46	26	15	10	11	6	5	195	175	120	46	26	47	10
16	255	434	150	105	95	85	75	55	40	–	33	11	7	5	6	3	–	105	85	–	69	14	–	10
17	270	520	155	115	105	95	75	55	40	–	34	12	8	9	6	2	–	120	85	–	58	25	–	6
18	307	520	172	135	105	120	85	65	40	–	38	17	11	9	6	5	–	135	120	85	38	17	31	6
19	307	520	172	135	105	120	85	65	40	–	38	17	11	9	6	5	–	135	120	85	38	17	31	6
20	430	840	255	175	155	135	105	85	55	–	42	24	15	13	7	7	–	175	135	120	42	39	26	20
21	250	360	155	95	85	75	55	40	–	–	31	11	7	7	4	–	–	105	85	–	53	18	–	6
22	250	360	155	95	85	75	55	40	–	–	31	11	7	7	4	–	–	105	85	–	53	18	–	10
23	270	535	165	105	95	85	75	55	40	–	33	11	7	5	6	3	–	105	75	–	55	23	–	20
24	400	765	245	155	135	120	105	85	55	–	40	23	10	8	7	7	–	155	135	105	40	23	32	35
25	360	625	185	175	155	135	105	85	55	–	42	25	14	13	5	6	–	175	135	–	92	38	–	6
26	330	555	175	155	135	120	105	85	55	–	40	23	10	7	7	7	–	155	135	105	40	23	31	10
27	250	360	155	95	85	75	55	40	–	–	31	11	7	7	4	–	–	105	85	–	53	18	–	10
28	490	985	295	195	175	155	135	105	85	55	46	26	15	10	11	6	5	195	175	135	46	26	47	35
29	270	520	155	115	105	95	75	55	40	–	34	12	8	9	6	2	–	120	85	–	58	25	–	6
30	420	723	215	195	175	155	120	96	65	–	78	36	34	22	18	13	–	195	175	120	78	70	53	6
31	490	985	295	195	175	155	135	105	85	55	46	26	15	10	11	6	5	195	175	135	46	26	47	20
32	420	723	215	195	175	155	120	96	65	–	78	36	34	22	18	13	–	195	175	120	78	70	53	10
33	270	535	165	105	95	85	75	55	40	–	33	11	7	5	6	3	–	105	75	–	55	23	–	10
34	430	840	175	175	155	135	105	85	55	–	42	24	15	13	7	7	–	175	135	120	42	39	26	90
35	400	765	245	155	135	120	105	85	55	–	40	23	10	8	7	7	–	155	135	105	40	23	32	20
36	225	434	150	105	95	85	75	55	40	–	33	11	7	5	6	3	–	105	85	–	69	14	–	10
37	430	840	175	175	155	135	105	85	55	–	42	24	15	13	7	7	–	175	135	120	42	39	26	35
38	430	840	175	175	155	135	105	85	55	–	42	24	15	13	7	7	–	175	135	120	42	39	26	20
39	375	745	240	135	120	105	95	75	55	–	36	18	10	5	8	5	–	135	105	–	38	46	–	20
40	375	745	240	135	120	105	95	75	55	–	36	18	10	5	8	5	–	135	105	–	38	46	–	10
41	270	520	155	115	105	95	75	55	40	–	34	12	8	9	6	2	–	120	85	–	58	25	–	10
42	325	624	210	115	105	95	75	55	40	–	34	12	8	9	6	2	–	115	95	–	58	25	–	35
43	420	723	215	195	175	155	120	96	65	–	78	36	34	22	18	13	–	195	175	120	78	70	53	10
44	400	765	245	155	135	120	105	85	55	–	40	23	10	8	7	7	–	155	135	105	40	23	32	10
45	270	535	165	105	95	85	75	55	40	–	33	11	7	5	6	3	–	105	75	–	55	23	–	20
46	325	624	210	115	105	95	75	55	40	–	34	12	8	9	6	2	–	115	95	–	58	25	–	35
47	330	555	175	155	135	120	105	85	55	–	40	23	10	7	7	7	–	155	135	105	40	23	31	6
48	420	723	255	195	175	155	120	96	65	–	78	36	34	22	18	13	–	195	175	120	78	70	53	6
49	330	555	175	155	135	120	105	85	55	–	40	23	10	7	7	7	–	155	135	105	40	23	31	10

все размеры в *мм*.

Тема 6.
Расчет оптимального числа витков обмоток и определение их конструктивных размеров для трехфазного трансформатора с естественным масляным охлаждением.

Цель: освоить методики расчетов числа витков в обмотках трансформаторов и конструктивных размеров всех их деталей.

VI – I. Общие теоретические сведения.

Принцип работы трансформатора ни чем не отличается от приципа работы асинхронного двигателя. Отличие только в том, что благодаря смещению обмоток в пространстве расточки статора на 120 электрических градусов в трехфазной асинхронной машине появляется вращающееся магнитное поле.

6. 1. Определение числа витков в обмотках.

Из сказанного выше следует, что методика расчета числа витков в обмотке одной фазы трансформатора wф ничем не отличается от той же цели в асинхронном двигателе, так как векторные диаграммы их отличаются друг от друга лишь в мелких деталях. А поэтому wф×E находится по той же формуле – делением фазной *эдс* (Eф) на $E_{1В}$:

$$w\text{ф} = \frac{E\text{ф}}{E_{1\text{В}}} \quad (6.1)$$

А так как падение напряжения ΔU на активном и реактивном сопротивлениях в трансформаторе величина весьма незначительная – доли процента, то без ущерба для точности расчета можно приложенное к обмотке фазы напряжение принять равным фазной *эдс* (т.е. Uф ≈ Еф). Вместе с тем, как известно из основ электротехники, *эдс* одного витка равна:

$$E_{1\text{В}} = 4{,}44 \times B \times f \times \Pi \quad \text{в}$$

В отличие от расчетов в асинхронном двигателе в формуле нет обмоточного коэффициента kоб (он равен единице), т. к.. магнитный поток в трансформаторе используется практически полностью. Следовательно, число витков в обмотке одной фазы равно, шт.:

$$w_{(\text{ВН,НН})} = \frac{U_{\text{Ф(ВН,НН)}}}{4{,}44 \times f \times Bc \times \Pi_C} \quad (6.2)$$

Полученные величины числа витков в обмотках высшего напряжения (ВН) и в обмотках низшего напряжения (НН) округляются до целого значения.
Примечание. При схеме соединения обмоток $Y/Z_{\text{Н}}$ найденное число витков обмотки НН увеличивается в 1,15 раз, т. к. они разделены на две равные части и размещены на двух соседних стержнях магнитопровода, вот почему и число $w_{\text{НН}}$ у этой схемы должно быть не только целым, но и четным.
После проведения округления проводится уточнение величин магнитных индукций *Вс* и *Вя* , так как они изменяются с изменением $w_{(\text{ВН})}$ и тогда потери (P_{XX}) и ток холостого хода (I_{XX}) могут выйти за пределы допустимого для рассчитываемого трансформатора.
После этого определяется число витков для регулировки напряжения – wр, так как согласно ГОСТ силовые трансформаторы должны иметь регулирование напряжения в пределах 5%, ступенями по 2,5%. Следовательно (2 × 2,5%), т. е. обмотка ВН трансформатора должна иметь на своем конце пять выводов от витков:
1) $w_{\text{ВН1}} = w_{\text{ВН}} + 2 \times w\text{р}$; 2) $w_{\text{ВН2}} = w_{\text{ВН}} + w\text{р}$; 3) $w_{\text{ВН3}} = w_{\text{ВН}}$;
4) $w_{\text{ВН4}} = w_{\text{ВН}} - w\text{р}$; 5) $w_{\text{ВН5}} = w_{\text{ВН}} - 2 \times w\text{р}$

Регулировочное число витков при 2,5% от $w_{ВН}$ равно:

$$w\text{р} = 0{,}025 \times w_{\text{ВН}} \quad (6.3)$$

Правильность расчетов соотношения числа витков в обмотках ВН и НН проверяется сравнением коэффициентов трансформации, найденных по напряжению k_U и по числу витков k_W на каждой ступени. Ошибка для первой ступени вычисляется по формуле, %:

$$\delta_1 = \frac{k_{U1} - k_{W1}}{k_{U1}} \ (6.4)$$

где коэффициенты трансформации по U и w:

$$k_{U1} = \frac{U_{(\text{ВН})1}}{U_{\text{НН}}}, \quad k_{w'1} = \frac{w'_{(\text{ВН})1}}{w'_{\text{НН}}}$$

при $U_{(ВН)1} = 1{,}05 \times U_{(ВН)}$
Для других ступеней трансформации:

$$U_{(ВН)2} = 1{,}025 \times U_{(ВН)}$$

$$U_{(ВН)3} = U_{(ВН)}$$

$$U_{(ВН)4} = 1{,}025 \times U_{(ВН)}$$

$$U_{(ВН)5} = 1{,}05 \times U_{(ВН)}$$

Аналогично определяется ошибка (δ_2, δ_3, δ_4, δ_5) по всем другим ступеням трансформации. Если ошибка δn на любой ступени окажется больше допустимой 0,5%, следует соответственно увеличить или уменьшить число витков в обмотке высшего напряжения и повторить расчет.
Примечание. При определении коэффициентов трансформации следует учитывать схему соединения обмоток трансформатора. Отношения числа витков равно отношению напряжений только при схемах соединения Y/Yн, $\triangle/\triangle$, $\triangle/Y$н и Y/Yн СУ. При схеме Y/Zн отношение витков обмоток будет в 1,15 раза меньше отношения напряжений.

6. 2. Выбор главной изоляции трансформатора.

Главной (поперечной) изоляцией масляного трансформатора является трансформаторное масло, у сухих трансформаторов – воздух. Поэтому для получения требуемой электрической прочности изоляции делаются необходимые изоляционные расстояния, которые заполняются маслом после опускания магнитопровода трансформатора с его обмотками в бак. Расстояния обеспечиваются нужной толщиной прокладок (их еще часто на производстве называют клиньями). Для изготовления клиньев обычно используют: дерево, картон, гетинакс, текстолит и т. п. материалы. Главная изоляция выполняется между обмотками разных напряжений на одном стержне, обмотками и магнитопроводом, обмотками и баком, обмотками одного напряжения, но разных фаз, расположенных на соседних стержнях. Минимальные изоляционные расстояния (рис. 6. 1) зависят: от рода изоляции (трансформаторное масло, воздух, битум и пр.), от класса напря–жения обмотки (0,38; 3; 6; 10; 35 *кв* и т. д.), от мощности трансформатора (10 – 630 *ква* и пр.) и конструкций обмоток трансформаторов. По приведенным показателям они находятся в таблицах справочников.

Для масляных трансформаторов с номинальным напряжением высшей стороны до 35 *кв* включительно и учетом конструкции обмоток изоляционные расстояния можно взять по таблицам 6. 1 и 6. 2.

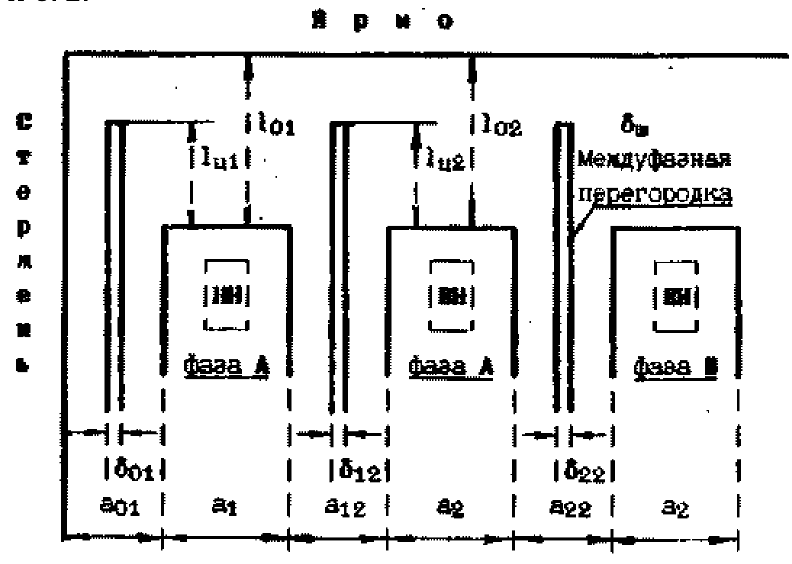


Рис. 6. 1. Главная изоляция обмоток ВН и НН масляных трансформаторов.

На рис. 6.1 изоляции: между обмоткой НН и стержнем – δ_{01}, а также между обмотками ВН и НН – δ_{12} , как правило, должны выполняться из бумажно–бакелитовых цилиндров, но в ремонтной практике чаще делаются из электрокартона. Для трансформаторов с номинальным напряжением обмотки ВН 35 *кв* для изоляции обмоток от ярм ставятся дополнительные изоляционные шайбы из толстого электрокартона.
Вместе с главной (поперечной) изоляцией в трансформаторе имеется продольная изоляция обмоток, под которой понимается изоляция между витками обмоточных проводов, между слоями витков и между катушками в катушечных обмотках. Выбор этой изоляции определяется электрической прочностью при частоте 50 *гц*. Она выбирается по справочным таблицам. Изоляция между витками обычно обеспечивается собственной изоляцией обмоточного провода.

Таблица 6. 1. Главная изоляция обмотки низшего напряжения.

Мощность трансформатора, Sн , *ква*	Напряжение обмотки, Uн, *кв*	Изоляционные расстояния, *мм*.			
		от ярм l_{01}	от стержня		
			δ_{01}	a_{01}	$l_п$
5... 250	0,4	15	Электрокартон 2×0,5	4	–
400... 630	0,4	как обмотки ВН	То же	5	–
1000	0,4	как обмотки ВН	4	15	18

Таблица 6. 2. Главная изоляция обмотки высшего напряжения,

Мощность трансформатора Sн, *ква*	Напряжение обмотки Uн, *кв*	изоляционные расстояния, *мм*.						
		от ярма		между ВН–НН одной фазы		выступ	между ВН – ВН разных фаз	
		l_{02}	δm	a_{12}	δ_{12}	l_{U2}	a_{22}	δ_{22}
25... 100	6 и 10	20	–	9	2,5	10	8	–
160... 630	6 и 10	30	–	9	3,0	15	10	–
160... 630	35	75	2	27	5,0	50	20	3
1000	6 и 10	50	–	20	4,0	20	18	–
1000	35	75	2	27	5,0	50	30	3

6. 3. Выбор типа конструкции обмоток трансформатора.

Выбор типа конструкции обмоток трехфазных трансформаторов с естественным масляным охлаждением (ТМ и ТМГ) зависит в основном от: их достоинств и недостатков; материала жилы обмоточного провода (медь, алюминий); номинальной мощности, *ква*; току на один стержень, *А*; номинального напряжения, *кв*; формы сечения жилы провода витка (круглый, прямоугольный). На практике для трансформаторов мощностью от 25 до 630 *ква*, напряжением до 35 *кв*, при токе на один стержень 15 до 800 *А* и материале жилы обмоточного провода медь и при токе на один стержень от 10 до 650 *А*, при материале жилы – алюминий, рекомендуются цилиндрические типы обмоток: для НН – одно или двухслойные из прямоугольного провода, для ВН – многослойные из круглого или прямоугольного провода. Достоинства: простая технология изготовления, хорошее охлаждение и высокая экономичность (дешевы). Недостатки: малая механическая прочность, уменьшенная охлаждающая поверхности по сравнению с обмотками, имеющими радиальные каналы охлаждения.

6. 4. Конструирование обмоток трансформатора.

Под конструированием понимается: выбор материалов изоляции обмоток, выбор марок и форм сечения обмоточных проводов, расчет этих сечений, определение размеров обмоток низшего и высшего напряжения (высоты, внутренних и наружных диаметров, радиальных каналов охлаждения).
Методики конструирования и расчетов для каждого типа обмоток индивиду–альны, поэтому рассмотрим их на примерах конкретных обмоток. У силовых трансформаторов мощностью до 1000 *ква*, напряжением высшей стороны до 35 *кв* с естественным масляным охлаждением при изготовлении на стержень магнитопровода первой укладывается обмотка НН.

6. 4. 1. Конструирование обмотки низшего напряжения.

При меньшем напряжении величина тока будет большей, это следует из формулы (S = U×I = *const*), отсюда для обеспечения большего заполнения и сокращения размеров обмотки сечение провода, как правило, берется прямоугольным. Тип обмотки НН, из изложенного выше, для ТМ и ТМГ при 0,4 *кв* берется цилиндрической. Определение размеров обмоток НН (высоты, диаметров и пр.) начинается с выбора изоляционного цилиндра, толщиной δ_{01} (см. рис. 6. 1), на который наматываются витки обмотки. Он служит также и для изоляции их от стержня. В ремонтной практике изоляционный цилиндр, как уже упоминалось, чаще всего делается мягким, т. е. намотанный из листов электроизоляционного картона (для трансформаторов с масляным заполнением – марки Г, толщиной 0,5 *мм*.). Количество слоев берется по табл. 6. 1.

6. 4. 1. 1. Выбор числа слоев обмотки.

Число слоев обмотки ($n_{\text{нн}}$) может быть 1, 2 иногда и 3 (а вот для схемы соединения обмоток Y/Zн только – 2). Выбор $n_{\text{НН}}$, в первую очередь, определяет соотношение размеров прямоугольного провода витка в осевом ($h_{\text{В}}$) и радиальном направлениях ($a_{\text{В}}$). Желательно чтобы это соотношение соответствовало значению $h_{\text{В}} \geq a_{\text{В}}$.

6. 4. 1. 2. Расчет числа витков в одном слое, шт.:

$$w_{1c(\text{НН})} = \frac{w_{\text{НН}}}{n_{\text{НН}}} \quad (6.5)$$

6. 4. 1. 3. Определение ориентировочного размера витка по оси обмотки, *мм.*:

$$h_{\text{В}}^{*} = \frac{lc - l_{01}}{w_{1\text{С(НН)}} \times k\text{н}} \quad (6.6)$$

где kн – коэффициент неплотности укладки, обычно принимается равным от 1,015 до 1,03.

6. 4. 1. 4. Определение ориентировочного сечения провода обмотки НН, *мм*^{2}. Расчет выполняется по выражению:

$$F_{\text{НН}}^{*} = \frac{I_{\text{Н(НН)}}}{J_{C}^{*}} \quad (6.7)$$

где $J^*_{\text{С}}$ – ориентировочная средняя плотность тока обмотки НН и ВН, $A/мм^2$ определяется из выражения:

$$J_{C}^{*} = k\text{м} \times ks \times \frac{P_{\text{КЗ}} - E_{1\text{В}}}{135 \times S_{\text{Н}} \times D} \quad (6.8)$$

где kм – коэффициент материала обмоточного провода, для алюминия kм = 0,463, для меди kм = 0,746; ks – коэффициент, учитывающий мощность трансформатора, для $S_{\text{Н}}$ = от 25 до 630 *ква* , ks = 0,95…0,99, $P_{\text{КЗ}}$ – потери короткого замыкания, *вт* (см. табл. 5. 3.), $E_{1\text{В}}$ – *эдс* одного витка, *в.*, $S_{\text{Н}}$ – номинальная мощность трансформатора, *ква*, D – диаметр окружности описанной вокруг стержня, *м*.

Окончательно допустимая ГОСТом плотность тока в обмотках низшего и высшего напряжения определяется только после расчета потерь короткого замыкания.

6. 4. 1. 5. Выбор марки и стандартного сечения обмоточного провода.

Выбор марки провода производится по электрической прочности изоля–ции (т.е. классу номинального напряжения – Uн), форме его сечения, экономическим соображениям. Для обмоток масляных трансформаторов напряжением – Uн = 0,4 *кв*, с прямоугольной формой сечения провода, рекомендуются марки: ПБ, АПБ, ПББО, АПББО. Выбор сечения выполняется по $F_{\text{НН}}^*$ и $h_{\text{В}}^*$ в таблицах справочников, ГОСТах, можно взять в приложениях 6–1. и 6–2. Стандартное сечение $F_{\text{НН(ГОСТ)}}$ берется ближайшее к $F_{\text{НН}}^*$ с учетом, чтобы размер витка прямоугольного провода с изоляцией по оси обмотки не превышал ($h_{\text{В}}^*$) и отношение размеров в витке обмоточного провода по оси к радиальному, по возможности, было не более чем 1,1. Лучше если радиальный размер ($a_{\text{В}}$) будет меньше, чем осевой размер ($h_{\text{В}}$), т. е. провод будет располагаться плашмя, а не на ребро, рис. 6. 2.

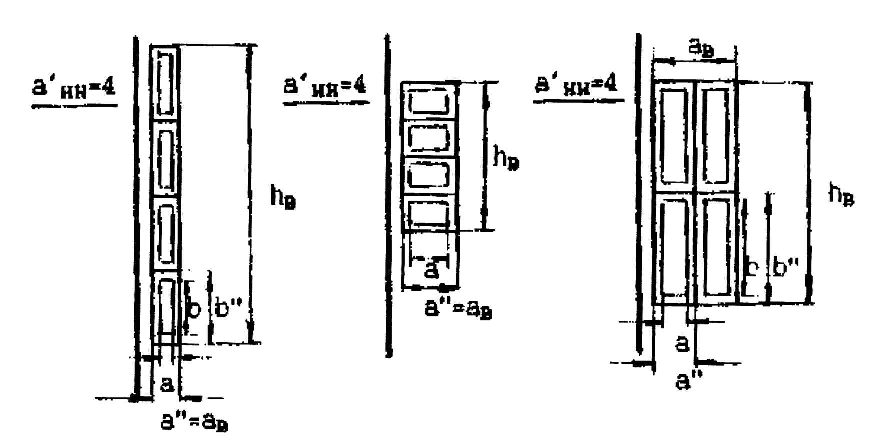


Рис. 6. 2. Эскизы сечения витка с параллельными сечениями
а) намотка витком плашмя; б) намотка витка проводом на ребро;
с) намотка витком плашмя с параллельными сечениями в два ряда.

В том случае, если указанное выше выполнить нельзя или сечение обмоточного провода $F_{НН}$ слишком большое (будет трудно гнуть при намотке) целесообразно поделить его на параллельные сечения ($a'_{НН}$). Например, сечение равно 20 *мм*^{2} – (большое), тогда вместо одного провода берутся обмоточные провода от 2–х или даже 4–х катушек, соответственно диаметрами 10 *мм*^{2} или 5 *мм*^{2} и проводить ими намотку как одним проводом, тогда суммарное сечение в любом случае равно 20 *мм*^{2}. Вместе с тем, следует строго соблюдать следующие правила:
– число параллельных проводов (сечений – $a'_{НН}$) при намотке на ребро (рис. 6. 2 *б*) не должно быть более 6, в самом крайнем случае 8. При намотке плашмя не более 4–х, в крайнем случае, 6–ти (рис. 6. 2 *а*, и рис. 6. 2 *с*);
– все провода должны иметь одинаковое сечение $F_{НН(ГОСТ)}$, в противном случае провода с меньшим сечением будут иметь повышенную плотность тока, а следовательно будут перегреваться (закон Джоуля–Ленца);
– в случаях, когда положить витки обмотки плашмя не удается, при намотке на ребро отношение размеров радиального (a) к осевому (b) для трансформаторов до 630 *ква* включительно должно быть не более 2–х.
Для удобства на производстве в документах, выбранный обмоточный провод записывается по форме:

$$\text{марка, сечение } \left(F_{\text{НН(ГОСТ)}}\right) \times \text{число } a'_{\text{НН}} \times \frac{a \times b \text{ (размеры без изол.)}}{a \times b \text{ (размеры с изол.)}}$$

Пример:

$$\text{АПББО } 55 \times 4 \times \frac{5{,}0 \times 11{,}0}{5{,}5 \times 11{,}5}$$

6. 4. 1. 6. Расчет высоты цилиндра (осевого размера) обмотки НН, *мм*.:

$$l_{\text{НН}} = h_{\text{В}} \times \left(w_{1\text{С(НН)}} \times k\text{н}\right) \quad (6.9)$$

где $h_В$ – фактический осевой размер витка, *мм*. Находится по эскизу рис. 6. 2.
6. 4. 1. 7. Проверка разместимости обмотки НН по оси стержня (в окне магнитопровода), *мм*.:

$$l_{\text{НН}} \leq l_C - 2 \times l_{01} \quad (6.10)$$

т. е. в том случае если полученная высота цилиндра обмотки $l_{НН}$ меньше высоты стержня $l_С$ с вычетом изоляционных расстояний l_{01} от ярм с 2–х сторон, обмотка низшего напряжения размещается на стержне.

6. 4. 1. 8. Расчет радиального размера обмотки НН. При $n_{НН} > 1$ он начинается с расчета толщины изоляции между слоями ($\delta_{ИЗ(НН)}$). Для ее изготовления обычно используется электрокартон марки Г, толщиной 0,5 *мм*. в два слоя (если конечно Uн = 0,4 *кв*). Нередко изоляция между слоями обмотки НН выполняется в виде масляного канала, но целесообразность последнего должна быть обоснована и в заключение подтверждена расчетом удельной теплоотдачи поверхности обмотки. При $n_{НН}$ > 2–х нередко межслойная изоляция выполняется и электрокартоном между первым и вторым слоем и в виде масляного канала между вторым и третьим слоем. Толщина межслоевой изоляции из электрокартона, будет равна (при указанной конструкции), *мм*.:

$$\delta_{\text{ИЗ(НН)}} = \delta_{\Gamma_{-0{,}5}} \times 2 \quad (6.11)$$

Радиальный размер (толщина) обмотки НН, *мм*.:

$$a_1 = a_{\text{В}} \times n_{\text{НН}} + \delta_{\text{ИЗ(НН)}} \times (n_{\text{НН}} - 1) + a_{\text{К}} \times n'_{\text{К(НН)}} \quad (6.12)$$

где $a_В \times n_{НН}$ – фактический радиальный размер витка, *мм*. Находится по эскизу рис. 6. 2; $a_К \times n'_{К(НН)}$ – радиальный размер масляного канала (4…5 *мм*.) и их количество. Масляные каналы выполняются с помощью реек нужной толщины (например: 4 – 5 *мм*.), которые раскладываются по окружности обмотки как НН так и ВН. Для трансформаторов до 630 –1000 *ква* число их выбирают исходя их удобства выполнения намотки (при указанных мощностях число реек рекомендуется брать около 6…8).

6. 4. 1. 9. Внутренний диаметр цилиндра обмотки НН, *мм*.:

$$D'_{\text{НН}} = D + 2 \times a_{01} \quad (6.13)$$

где a_{01} – главная изоляция от стержня (рис. 6. 1, табл. 6. 1).
6. 4. 1. 10. Наружный диаметр цилиндра обмотки НН, *мм*.:

$$D'_{\text{НН}} = D'_{\text{НН}} + 2 \times a_1 \quad (6.14)$$

6. 4. 2. Конструирование обмотки высшего напряжения.

При большем напряжении величина тока будет меньшей, это следует из формулы ($S = U \times I$ = const). Отсюда, так как ток мал сечение провода то же будет малым, по этому оно, как правило, берется круглым. Тип обмотки ВН, смотри выше, для трансформаторов типа ТМ и ТМГ при мощности до 630 *ква* и напряжении до 35 *кв* берется цилиндрической, с размещением поверх обмотки НН. Определение размеров обмотки (высоты, диаметров и пр.) начинается с выбора изоляционного цилиндра, толщиной 12 (см. рис. 6. 1), на который наматываются витки обмотки ВН. Иногда изоляционный цилиндр, размещается между наружным диаметром обмотки НН и внутренним диаметром обмотки ВН. В ремонтной практике этот изоляционный цилиндр, также как и для обмотки НН, чаще всего делается мягким, т. е. составленным из листов элек–троизоляционного картона для аппаратов с масляным заполнением, толщиной 0,5 *мм*. Количество слоев берется по расчету исходя из требуемой толщины цилиндра δ_{12} (табл. 6. 2).

6. 4. 2. 1. Выбор марки и стандартного сечения обмоточного провода.

Выбор марки провода производится, также как и при конструировании обмоток НН, по электрической прочности изоляции (т.е. классу номинального напряжения обмотки ВН – $U_Н$), форме его сечения, экономическим соображениям. Для обмоток масляных трансформаторов напряжением – $U_Н$ = 10 и 35 *кв*, мощностью от 25 до 1000 *ква* для сельских электрических сетей рекомендуется круглая форма сечения провода марок: ПБ и АПБ.

6. 4. 2. 2. Расчет ориентировочного сечения провода обмотки ВН, *мм*^{2}.:

$$F^*_{\text{ВН}} = \frac{I_{\text{Н(ВН)}}}{j^*_{\text{ВН}}} \quad (6.15)$$

где $j^*_{ВН}$ – ориентировочная плотность тока обмоток ВН, определяется из выражения, $А/мм^2$.:

$$j^*_{\text{ВН}} = 2 \times j^*_C - j_{\text{НН}}$$

где $j^*_С$ – ориентировочная средняя плотность тока обмоток ВН и НН, $А/мм^2$. Рассчитывается (см. пункт 6. 4. 1. 4.), но может быть выбрана по табл. 6. 4.
$j_{НН}$ – фактическая плотность тока обмотки НН, $А/мм^2$.:

$$j_{\text{НН}} = \frac{I_{\text{Н(НН)}}}{F_{\text{НН(ГОСТ)}} \times a'_{\text{НН}}} \quad (6.16)$$

Стандартное сечение $F_{\text{НН(ГОСТ)}}$ берется по справочникам (или по приложениям 6–1. и 6–2.) ближайшее к $F^*_{\text{ВН}}$. Допустимо в случае необходимости сечение провода $F_{\text{ВН}}$ делить на параллельные сечения ($a'_{\text{ВН}}$).

Таблица 6. 3.

Рекомендуемые средние плотности тока в обмотках НН и ВН ($j^*_{\text{С}}$) трансформаторов с потерями к.з. по ГОСТ.

Мощность трансформатора, Sн, *ква*	25 – 40	63 – 630	до 1000	Примечания
Медь	1,8 – 2,2	2,2 – 3,5	2,2 – 3,5	Плотность тока в обмотках из алюминиевой ленты берется как для провода
Алюминий	1,1 – 1,8	1,2 – 2,5	1,5 – 2,6	

Выбранный обмоточный провод записывается по форме:

$$\text{марка, сечение } \left(F_{\text{ВН(ГОСТ)}}\right) \times \text{число } a'_{\text{НН}} \times \frac{d_{\text{ВН}}(\text{размеры без изол.})}{d'_{\text{ВН}}(\text{размеры с изол.})}$$

Пример:

$$\text{АПБ } 4{,}91 \times 1 \times \frac{2{,}5}{2{,}8}$$

6. 4. 2. 3. Фактическая плотность тока в обмотке ВН, $A/мм^2$.:

$$J_{\text{ВН}} = \frac{I_{\text{Н(ВН)}}}{F_{\text{ВН(ГОСТ)}} \times a'_{\text{ВН}}} \quad (6.17)$$

6. 4. 2. 4. Определение ориентировочного числа витков в одном слое обмотки, шт.:

$$w^*_{1\text{С(ВН)}} = \frac{lc - 2 \times l_{02}}{d'_{\text{ВН}} \times k\text{н}} \quad (6.18)$$

Таким образом по $w^*_{1\text{С(ВН)}}$ после округления находится $w_{1\text{С(ВН)}}$.

6. 4. 2. 5. Расчет числа слоев в обмотке ВН, шт.:

$$n_{\text{ВН}} = \frac{w_{\text{ВН}} + 2 \times w\text{р}}{w_{1\text{С(ВН)}}} \quad (6.19)$$

где $n_{\text{ВН}}$ – тоже округляется до большего целого значения. Обычно это делается в том случае, если число витков в одном слое занимает более половины высоты обмотки ($l_{\text{С}}$ – $2 \times l_{02}$).

6. 4. 2. 6. Фактическое число витков в одном слое обмотки ВН, шт. (округляется до целого значения):

$$w_{1\text{С(ВН)}} = \frac{w_{\text{ВН}} + 2 \times w\text{р}}{n_{\text{ВН}}} \quad (6.19)$$

6. 4. 2. 7. Расчет высоты (осевого размера) обмотки ВН, *мм.*:

$$l_{\text{ВН}} = d'_{\text{ВН}} \times a'_{\text{ВН}} \times \left(w_{1(\text{ВН})} + 1\right) \times k_{\text{Н}} \quad (6.21)$$

6. 4. 2. 8. Проверка разместимости обмотки ВН по оси в окне магнитопровода, *мм.*:

$$l_{\text{ВН}} \leq l_C - 2 \times l_{02} \quad (6.22)$$

т. е. в том случае, если полученная высота цилиндра обмотки $l_{\text{ВН}}$ меньше высоты стержня $l_{\text{С}}$ с вычетом изоляционных расстояний l_{02} от ярм с 2–х сторон, то обмотка низшего напряжения размещается на стержне.

6. 4. 2. 9. Расчет радиального размера обмотки ВН.
Начинается с выбора и расчета толщины продольной изоляции $\delta_{\text{ИЗ(ВН)}}$ между слоями. Как правило, при круглом проводе из которого делается обмотка ВН, она выполняется кабельной бумагой марки К–120 (толщиной К–120 = 0,12 *мм.*). Число слоев изоляции, а следовательно и толщина изоляции между слоями $\delta_{\text{ИЗ(ВН)}}$ определяется по максимальному (суммарному) рабочему напряжению (Um) между витками в двух соседних слоях, которые берутся в табл. 6. 4. Максимальное напряжение рассчитывается по формуле, *в*:

$$Um = E_{1\text{В}} \times 2 \times w_{1\text{С(ВН)}} \quad (6.23)$$

где $E_{1\text{В}}$ – ЭДС одного витка.

Таблица 6. 4. Междуслойная изоляция в многослойных цилиндрических обмотках.

U_m в двух слоях, *в*	До 1000	1001 – 2000	2001 – 3000	3001 – 4000	4001 – 5000
Число слоев К–120, шт	2×0,12	3×0,12	4×0,12	5(6)×0,12	7(8)×0,12

В дальнейшем если при расчете удельной теплоотдачи обмоток ВН она окажется завышенной, для улучшения охлаждения в обмотке ВН делаются масляные каналы (см. выше – 6. 4. 1. 8), число которых определяют по допустимой удельной теплоотдаче.
– радиальный размер обмотки ВН, *мм.*:

$$a_2 = d'_{\text{ВН}} \times n_{\text{ВН}} + \delta_{\text{ИЗ(ВН)}} \times \left(n_{\text{ВН}} - 1 n'_{\text{К(ВН)}}\right) + a_{\text{К}} \times n'_{\text{К(ВН)}} \quad (6.24)$$

где $d'_{\text{ВН}}$ – диаметр провода, из которого выполняется обмотка ВН, с изоляцией, *мм.*; $a_{\text{К}} \times n'_{\text{К(ВН)}}$ – радиальный размер масляного канала охлаждения ($a_{\text{К}}$) и их количество ($n'_{\text{К(ВН)}}$).
6. 4. 2. 10. Внутренний диаметр цилиндра обмотки ВН, *мм.*:

$$D'_{\text{ВН}} = D''_{\text{НН}} + 2 \times a_{12} \quad (6.25)$$

где a_{12} – главная изоляция между обмотками НН и ВН (рис. 6. 1, табл. 6. 2).
6. 4. 2. 11. Наружный диаметр цилиндра обмотки ВН, *мм.*:

$$D''_{\text{ВН}} = D'_{\text{ВН}} + 2 \times a_2 \quad (6.26)$$

6. 4. 2. 12. Проверка разместимости обмоток в окне магнитопровода трансформатора:

$$D''_{\text{ВН}} \leq C - a_{22} \quad (6.27)$$

где a_{22} – главная изоляция между обмотками ВН двух соседних фаз. Если условие не выполняется, проводят арифметическую проверку расчета, устанавливается возможность увеличения высоты обмоток, замены алюминиевого обмоточного провода на медный, проверяется возможность увеличения магнитной индукции в стержнях и ярмах по потерям (P_{XX}) и току (I_{XX}) холостого хода . Если после всего указанного условие (6. 27) не выполняется, следует снизить номинальную мощность трансформатора ($S_{\text{Н}}$).

VI – II. Практическое использование теории в расчетах.

Задача. Рассчитать оптимальное число витков и определить размеры обмоток трехфазного трансформатора с естественным масляным охлаждением – ТМ для магнитопровода с параметрами указанными в задаче "Темы № 5.", т. е. (см. рис. 5. 1, рис. 5. 2, рис. 5. 3): C = 250 *мм.*; lc = 360 *мм.*; Cок = 155 мм. Как уже установлено Пс = 0,0065 $м^2$; Пя = 0,0071 $м^2$; Dc = 0.1 *м.*; Bc = 1,64 *Тл.*; Bc = 1,5 *Тл.*; Sн = 40 *ква*. Принят для расчета и изготовления трансформатор ТМ 40/10–0,4 со схемой соединения обмоток Y/Yн.

Решение. Определение числа витков в обмотках.
1. Определяем число витков в обмотке одной фазы НН, шт.:

$$w_{\Phi(\text{НН})} = \frac{U_{\Phi(\text{НН})}}{4{,}44 \times f \times Bc \times \text{Пс}} = \frac{230}{4{,}44 \times 50 \times 1{,}64 \times 0{,}0065} = 97{,}2$$

После округления принимаем $w_{\Phi(\text{НН})}$ = 98 витков.
2. Определяем число витков в обмотке одной фазы ВН, шт.:

$$w_{\Phi(\text{ВН})} = \frac{U_{\Phi(\text{ВН})}}{4{,}44 \times f \times Bc \times \text{Пс}} = \frac{5780}{4{,}44 \times 50 \times 1{,}64 \times 0{,}0065} = 2442{,}4$$

После округления принимаем $w_{\Phi(\text{ВН})}$ = 2442 витка. В соответствии с принятой схемой соединения обмоток Y/Yн корректировки числа витков обмоток не требуется.
Проверка $w_{\Phi(\text{ВН})}$. Так как в обмотке ВН было проведено округление числа витков, проверим принятое $w_{\text{ВН}}$ по допустимым потерям и току холостого хода. Для этого находим магнитную нагрузку в стержнях:

$$Bc = \frac{U_{\Phi(\text{ВН})}}{4{,}44 \times f \times \text{Пс} \times w_{\Phi(\text{ВН})}} = \frac{5780}{4{,}44 \times 50 \times 2442 \times 0{,}0065} = 1{,}64 \text{ Тл.}$$

Как следует из расчета, округление числа витков в обмотке ВН на магнитную индукцию не повлияло, следовательно, потери и ток холостого хода останутся неизменными (см. табл. 5. 6. и табл. 5. 7.).
3. Найдем регулировочное число витков. При 2,5% от $w_{\text{ВН}}$ оно равно:

$$w\text{р} = 0{,}025 \times w_{\text{ВН}} = 0{,}025 \times 2442 = 61 \text{ виток}$$

4. Рассчитаем число витков, приходящихся на каждой из выводов обмотки ВН фазы А, рис. 6. 3, шт. Данные расчетов сведем в табл. 6.5.:

А 5 4 3 2 1

Рис. 6. 3. Выводы обмотки высшего напряжения фазы А.

Таблица 6. 5. Число витков между выводами обмотки ВН.

А – 1 = $w_{ВН}$ + 2×wр	А – 2 = $w_{ВН}$ + wр	А – 3 = $w_{ВН}$	А – 4 = $w_{ВН}$ – wр	А – 5 = $w_{ВН}$ – 2× wр
2442 + 2 × 61 = 2564	2442 + 61 = 2503	2442	2442 – 61 = 2381	2442 – 2 × 61 = 2320

5. Проверим правильность расчетов соотношения числа витков в обмотках ВН и НН, которое не должно превышать согласно ГОСТ 0,5%.
5. 1. Ошибка для первой ступени, % – коэффициенты трансформации по напряжению и числу витков:
– коэффициенты трансформации по напряжению и числу витков:

$$К_{U1} = \frac{U_{(ВН)1}}{U_{(НН)}} = \frac{1{,}05 \times 5780}{230} = 26{,}38 \qquad К_{W1} = \frac{w_{(ВН)1}}{w_{(НН)}} = \frac{2564}{98} = 26{,}16$$

– несоответствие:

$$\delta_1 = \frac{К_{U1} - К_{W1}}{К_{U1}} \times 100 = \frac{26{,}38 - 26{,}16}{26{,}38} \times 100 = 0{,}83\%$$

Следовательно, соотношение витков обмоток НН и ВН выходит за пределы допустимого (0,5%). Проводим по коэффициенту трансформации $К_{U1}$ коррекцию числа витков обмотки ВН, с одной стороны:

$$К_{U1} = \frac{x}{w_{НН}}; \quad w_{(ВН)1} = \mathrm{x} = К_{U1} \times w_{(НН)1} = 26{,}38 \times 98 = 2585 \text{ шт.}$$

с другой стороны:

$$w_{(ВН)1} = 1{,}05 \times w(\text{ВН}), \text{тогда } w_{ВН} = \frac{w_{(ВН)1}}{1{,}05} = \frac{2585}{1{,}05} = 2462$$

число витков регулировочных:

$$w\text{р} = 0{,}025 \times w_{ВН} = 0{,}025 \times 2462 = 61{,}55 \text{ шт.}$$

принимаем wр = 62 витка, тогда на других ступенях обмотки ВН число витков будет равно (см. табл. 6. 6).

Таблица 6. 6. Число витков между выводами обмотки ВН (после коррекции).

А – 1 = $w_{ВН}$ + 2×wр	А – 2 = $w_{ВН}$ + wр	А – 3 = $w_{ВН}$	А – 4 = $w_{ВН}$ – wр	А – 5 = $w_{ВН}$ – 2× wр
2462 + 2 × 62 = 2586	2442 + 62 = 2524	2462	2462 – 62 = 2400	2462 – 2 × 62 = 2338

– коэффициенты трансформации по напряжению и числу витков:

$$К_{U1} = \frac{U_{(ВН)1}}{U_{(НН)}} = \frac{1{,}05 \times 5780}{230} = 26{,}38 \qquad К_{W1} = \frac{w_{(ВН)1}}{w_{(НН)}} = \frac{2586}{98} = 26{,}388$$

– несоответствие:

$$\delta_1 = \frac{К_{U1} - К_{W1}}{К_{U1}} \times 100 = \frac{26{,}38 - 26{,}388}{26{,}38} \times 100 = -0{,}03\%$$

Соотношение витков обмоток НН и ВН не выходит за пределы допустимого (0,5%). Проводим проверку по другим ступеням.
5.2. Ошибка для второй ступени, %:

– коэффициенты трансформации по напряжению и числу витков:

$$К_{U1} = \frac{U_{(\text{ВН})2}}{U_{\text{НН}}} = \frac{1{,}025 \times 5780}{230} = 25{,}76 \qquad К_{W1} = \frac{w_{(\text{ВН})2}}{w_{(\text{НН})}} = \frac{2524}{98} = 25{,}76$$

– несоответствие:

$$\delta_1 = \frac{К_{U1} - К_{W1}}{К_{U1}} \times 100 = \frac{25{,}76 - 25{,}76}{25{,}76} \times 100 = 0\%$$

5. 3. Ошибка для третей ступени, %.
– коэффициенты трансформации по напряжению и числу витков:

$$К_{U1} = \frac{U_{(\text{ВН})3}}{U_{\text{НН}}} = \frac{5780}{230} = 25{,}13 \qquad К_{W1} = \frac{w_{(\text{ВН})3}}{w_{(\text{НН})}} = \frac{2462}{98} = 25{,}12$$

– несоответствие:

$$\delta_1 = \frac{К_{U1} - К_{W1}}{К_{U1}} \times 100 = \frac{25{,}13 - 25{,}12}{25{,}13} \times 100 = 0{,}04\%$$

5. 4. Ошибка для четвертой ступени, %.
– коэффициенты трансформации по напряжению и числу витков:

$$К_{U1} = \frac{U_{(\text{ВН})4}}{U_{\text{НН}}} = \frac{0{,}975 \times 5780}{230} = 24{,}5 \qquad К_{W1} = \frac{w_{(\text{ВН})4}}{w_{(\text{НН})}} = \frac{2400}{98} = 24{,}49$$

– несоответствие:

$$\delta_1 = \frac{К_{U1} - К_{W1}}{К_{U1}} \times 100 = \frac{24{,}5 - 24{,}19}{24{,}5} \times 100 = 0{,}04\%$$

5. 5. Ошибка для пятой ступени, %.
– коэффициенты трансформации по напряжению и числу витков:

$$К_{U1} = \frac{U_{(\text{ВН})5}}{U_{\text{НН}}} = \frac{0{,}95 \times 5780}{230} = 23{,}87 \qquad К_{W1} = \frac{w_{(\text{ВН})5}}{w_{(\text{НН})}} = \frac{2338}{98} = 23{,}86$$

– несоответствие:

$$\delta_1 = \frac{К_{U1} - К_{W1}}{К_{U1}} \times 100 = \frac{23{,}87 - 23{,}59}{23{,}87} \times 100 = 0{,}04\%$$

Соотношение витков обмоток НН и ВН по всем проверенным ступеням от 2–го до 5–го не выходит за пределы допустимого (0,5%).
6. Так как в обмотке ВН была проведена коррекция числа витков, проверим принятое W ВН по допустимым потерям и току холостого хода. Для этого находим магнитную нагрузку в стержнях:

$$Bc = \frac{U_{\Phi(\text{ВН})}}{4{,}44 \times f \times \text{Пс} \times w_{\Phi(\text{ВН})}} = \frac{5780}{4{,}44 \times 50 \times 2462 \times 0{,}0065} = 1{,}63 \text{ Тл.}$$

Как следует из расчета, коррекция числа витков в обмотке ВН повлияло на магнитную индукцию настолько незначительно, что потери и ток холостого хода не выйдут за пределы допустимого (см. табл. 5. 6 и табл. 5. 7). Исходя из изложенного, можно приступить к определению конструктивных размеров обмоток НН и ВН трансформатора.

7. Проведем выбор главной изоляции трансформатора.
Для ТМ – 40/10, при напряжении низшей стороны 0,4 кВ изоляционные расстояния обмотки НН составляют (табл. 6. 1).

Мощность трансформатора, S_B, *ква*	Напряжение обмотки, $U_Н$, *кв*	Изоляционные расстояния, *мм.*			
		от ярм	от стержня		
		l_{01}	δ_{01}	a_{01}	$l_П$
40	0,4	15	электрокартон 2×0,5	4	–

8. Выполним выбор типа конструкции обмоток трансформатора.
Исходя из практических рекомендаций, для трансформатора с естественным масляным охлаждением (тип ТМ), мощностью 40 *ква*, напряжением высшей стороны 10 *кв*, напряжением низшей стороны 0,4 *кв* при токе на один стержень для НН – 57,8 *А* и для ВН – 2,3 *А*, при материале жилы обмоточного провода – алюминий, принимаем цилиндрические типы обмоток: для НН – двухслойную ($n_{НН}$) из прямоугольного провода, для ВН – многослойную из круглого провода.
Достоинства обмоток: простая технология изготовления, хорошее охлаждение и высокая экономичность (дешевы).
Недостатки обмоток: малая механическая прочность, уменьшение охлаждающей поверхности по сравнению с обмотками, имеющими радиальные каналы охлаждения.
9. Конструирование обмотки низшего напряжения (НН).
9. 1. Для изоляции обмотки НН от стержня принимаем мягкий цилиндр из электроизоляционного картона для работы в масле, марки Г, толщиной 0,5 *мм.*, в соответствии с табл. 6. 1, в два слоя (n_{01}), тогда $\delta_{01} = \delta \times n_{01} = 0{,}5 \times 2 = 1{,}0$ *мм.*
9. 2. Определим номинальный ток обмотки НН трансформатора:

$$I_{Н(НН)} = \frac{S_Н}{\sqrt{3} \times U_{Н(НН)}} = \frac{40}{\sqrt{3} \times 0{,}4} = 57{,}8\ A$$

9. 3. Найдем ориентировочное сечения провода, *мм*^{2}.:

$$F^*_{НН} = \frac{I_{Н(НН)}}{J^*_C} = \frac{57{,}8}{1{,}3} = 44{,}45\ \text{мм}^2$$

где J^*_C – ориентировочная средняя плотность тока обмотки НН и ВН, *А*/*мм*^{2} определяется из выражения:

$$J^*_С = k\text{м} \times ks \times \frac{P_{КЗ} \times E_{1В}}{135 \times S_Н \times D} = 0{,}463 \times 0{,}095 \times \frac{680 \times \frac{230}{98}}{135 \times 40 \times 0{,}1} = 1{,}3$$

где kм – коэффициент материала обмоточного провода, для алюминия, kм = 0,463; ks – коэффициент учитывающий мощность трансформатора, для Sн = 40 *ква* он равен ks = 0,95; $P_{КЗ}$ – потери короткого замыкания, 680 *вт*. (см. табл. 5. 3.). $E_{1В}$ – *эдс* 1–го витка, при 0,4 *кв* фазная величина 400/98 *в*; Sн – номинальная мощность трансформатора, 40 *ква*; D – диаметр окружности описанной вокруг стержня, 0,1 *м*.
9. 4. Рассчитаем число витков в одном слое обмотки:

$$w_{1С(НН)} = \frac{w_{НН}}{n_{НН}} = \frac{98}{2} = 49\ \text{шт.}$$

9. 5. Найдем ориентировочный осевой размер витка обмоточного провода:

$$h_{\text{В}}^{*} = \frac{lc - 2 \times l_{01}}{\left(w_{1\text{С(НН)}} + 1\right) \times k\text{н}} = \frac{360 - 2 \times 15}{(49 + 1) \times 1{,}03} = 6{,}6 \text{ мм.}$$

9. 6. Выберем стандартный обмоточный провод и его марку. Устанавливаем по табл. ГОСТ, что при $h^{*}_{\text{В}}$ = 6,6 *мм*. нужного сечения обмоточного провода ($F^{*}_{\text{НН}}$ = 44,46 *мм*^{2}) – нет. Поэтому принимаем два параллельных сечения (a'= 2) с сечением одного провода F_1^{*} = 44,46/2 = 22,23 *мм*^{2}. Тогда по таблице ГОСТ на обмоточные провода прямоугольного сечения берем стандартное сечение провода $F_{1(\text{ГОСТ})}$ = 23,1 *мм*^{2} с осевым размером (b) = 6,0 *мм*. и радиальным размером (a) = 4,0 *мм*. и двумя такими проводами (a' = 2) наматываем обмотку НН как одним проводом (см. рис. 6. 4).

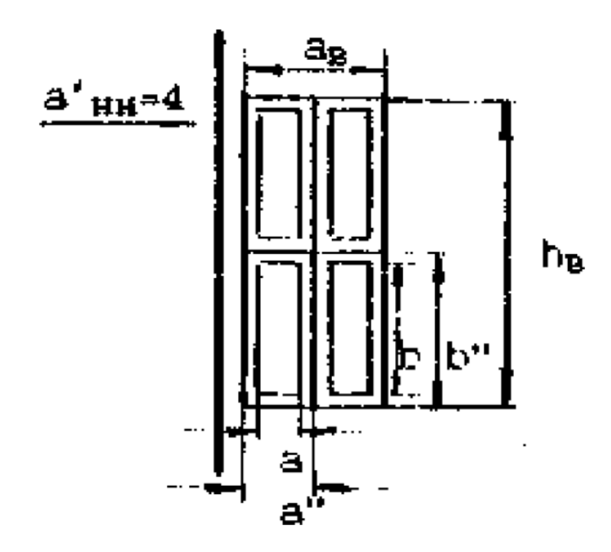


Рис. 6. 4. Эскиз размещения обмоточных проводов при двух параллельных сечениях (a' = 2) в радиальном направлении.

Следовательно, стандартное сечение витка $F_{\text{НН(ГОСТ)}} = F_{1(\text{ГОСТ})}$ a'= 23,1⊠2 = 46,2 *мм*^{2} будет иметь осевой размер витка (без изоляции) $h_{\text{В}} = b$ = 6 *мм*. и радиальный (без изоляции) – $a_{\text{В}} = a \times a'$ = 4 × 2 = 8 *мм*.

Выбор марки обмоточного провода выполняем по рекомендациям проектирования и производства трансформаторов. Для номинального напряжения Uн = 0,4 *кв*, прямоугольного сечения – наиболее рационален дешевый алюминиевый обмоточный провод марки АПББО (провод с алюминиевой жилой, бумажной изоляцией и хлопчатобумажной нитью уложенной сверху по винту). По справочнику находим, что толщина изоляции на две стороны марки провода АПББО при сечении 23,1 *мм*^{2} равна 0,5 *мм*. Запись выбранного обмоточного провода выполним по форме:

$$\text{АПББО} \quad 23{,}1 \times 2 \times \frac{4{,}0 \times 6{,}0}{4{,}5 \times 6{,}5}$$

9. 7. Расчет высоты (осевого размера) обмотки НН:

$$l_{\text{НН}} = h_{\text{В}} \times \left(w_{1\text{С(НН)}} + 1\right) \times k\text{н} = 6{,}5 \times (49 + 1) \times 1{,}015 = 329{,}8 \text{ мм.}$$

9. 8. Проверка разместимости обмотки НН по оси стержня (в окне магнитопровода), *мм*.:

$$l_{\text{НН}} \leq lc - 2 \times l_{01} = 360 - 2 \times 15 = 330 \text{ мм.}$$

т. к. 329,8 *мм*. < 330 *мм*. – по высоте стержня обмотка в окне магнитопровода разместима.

9. 9. Рассчитаем радиальный размер обмотки НН. Каждый слой обмотки НН выполняется (см. пункт 9. 6) из 2–х проводов марки АПББО которые укладываются друг на друга и плашмя на изоляционный цилиндр следовательно, толщина одного слоя или иначе радиальный размер одного витка – $a_В = 2 \times 4{,}5 = 9$ *мм*. (рис. 6. 4.). Количество слоев (пункт 8) принято равным 2–м.
Для обеспечения изоляции и достаточного охлаждения (учитываем, что каждый слой состоит из 2–х проводов) между слоями делаем масляный канал. Его выполним с помощью 6–ти реек: длиной 360 *мм*. и толщиной 4 *мм*., которые разложим по окружности первого слоя обмотки НН и закрепим их хлопчатобумажной лентой, уложенной по спирали.
Найдем радиальный размер (толщину) обмотки НН:

$$a_1 = a_{\text{В}} \times n_{\text{НН}} + \delta_{\text{ИЗ(НН)}} \times (n_{\text{НН}} - 1) + a_{\text{К}} \times n'_{\text{К(НН)}} = 9 \times 2 + 4 \times 1 = 22 \text{ мм}.$$

9. 10. Внутренний диаметр цилиндра обмотки НН:

$$D'_{\text{НН}} = D + 2 \times a_{01} = 100 + 2 \times 4 = 108 \text{ мм}.$$

где a_{01} – главная изоляция от стержня (рис. 6. 1, табл. 6. 1).
9. 11. Наружный диаметр цилиндра обмотки НН:

$$D''_{\text{НН}} = D'_\text{НН} + 2 \times a_1 = 100 + 2 \times 22 = 152 \text{ мм}.$$

10. Конструирование обмотки высшего напряжения.

Тип обмотки высшего напряжения выбран (пункт 8) – цилиндрический многослойный.

10. 1. Для твердой изоляции обмотки НН от обмотки ВН принимаем мягкий цилиндр из электроизоляционного картона для работы в масле, марки Г, толщиной 0,5 *мм*. В соответствии с табл. 6. 2, толщина цилиндра δ_{12} должна быть равна 2,5 *мм*.
10. 2. Найдем число слоев (n_{12}), электрокартона для цилиндра

$$n_{12} = \frac{\delta_{12}}{\delta} = \frac{2{,}5}{0{,}5} = 5 \text{ шт}.$$

10. 3. Определим номинальный ток обмотки ВН трансформатора:

$$I_{\text{Н(ВН)}} = \frac{S_{\text{Н}}}{\sqrt{3} \times U_{\text{Н(ВН)}}} = \frac{40}{\sqrt{3} \times 10} = 2{,}3\ A$$

10. 4. Выбираем марку и стандартное сечение обмоточного провода.
Номинальное напряжение обмотки ВН – 10 *кв*, номинальный ток – 2,3 *А*, трансформатор с естественным масляным охлаждением, мощность – 40 *ква*, предназначен для сельских электрических сетей. Исходя из изложенного воспользуемся рекомендациями производства и выберем марку алюминиевого обмоточного провода АПБ с круглым сечением жилы.
10. 5. Найдем ориентировочное сечение провода обмотки ВН:

$$F^*_{\text{ВН}} = \frac{I_{\text{Н(ВН)}}}{J^*_{\text{ВН}}} = \frac{2{,}3}{1{,}35} = 1{,}70 \text{ мм}^2$$

где $j^*_{\text{ВН}}$ – ориентировочная плотность тока обмоток ВН, определяется из выражения, $A/мм^2$:

$$J^*_{\text{ВН}} = 2 \times J^*_C - J_{\text{НН}} = 2 \times 1{,}3 - 1{,}25 = 1{,}35\text{А/мм}^2$$

Jс* – ориентировочная средняя плотность тока обмоток ВН и НН, $А/мм^2$. Она рассчитана в пункте 9. 3 и равна 1,3 $А/мм^2$; $J_{\text{НН}}$ – фактическая плотность тока обмотки НН, $А/мм^2$:

$$J_{\text{НН}} = \frac{I_{\text{Н(НН)}}}{F_{\text{НН(ГОСТ)}} \times a'_{\text{НН}}} = \frac{57{,}8}{23{,}1 \times 2} = 1{,}25\ \ A/\text{мм}^2$$

По значению $F_{\text{ВН}}$* = 1,70 $мм^2$ в таблицах ГОСТ берем ближайшее стандартное сечение обмоточного провода (см. приложение 6–1.). $F_{\text{ВН(ГОСТ)}}$ = 1,77 $мм^2$, с диаметром голого провода $d_{\text{АПБ(ГОСТ)}}$ = 1,5 *мм*. Для марки провода АПБ с толщиной изоляции на две стороны $2\delta_{\text{АПБ}}$ = 0,4 *мм*., т. е. диаметр этого провода с изоляцией $d_{\text{АПБ'(ГОСТ)}}$ = 1,9 *мм*. Выбранный обмоточный провод записываем по форме:

$$\text{АПБ}\ \ 1{,}77 \times 1 \times \frac{1{,}5}{1{,}9}$$

10. 6. Определим фактическую плотность тока в обмотке ВН:

$$J_{\text{ВН}} = \frac{I_{\text{Н(ВН)}}}{F_{\text{ВН(ГОСТ)}} \times a'_{\text{НН}}} = \frac{2{,}3}{1{,}77 \times 1} = 1{,}3\ \ A/\text{мм}^2$$

10. 7. Рассчитаем ориентировочное число витков в одном слое обмотки:

$$w^*_{1\text{С(ВН)}} = \frac{lc - 2 \times l_{02}}{d'_{\text{ВН}} \times k\text{н}} = \frac{360 - 2 \times 20}{1{,}9 \times 1{,}03} = 163{,}5 \text{ витка}$$

После округления принимаем $w_{1\text{С(ВН)}}$ = 162 витка.
10. 8. Найдем число слоев в обмотке ВН:

$$n_{\text{ВН}} = \frac{w_{\text{ВН}} + 2 \times w\text{р}}{w_{1\text{С(ВН)}}} = \frac{2564}{162} = 15{,}83 \text{ слоя}$$

После округления до большего целого значения $n_{\text{ВН}}$ = 16 слоям.
10. 9. Определим фактическое число витков в одном слое обмотки ВН:

$$w_1C(\text{ВН}) = \frac{w_{\text{ВН}} + 2 \times w\text{р}}{n_\text{ВН}} = \frac{2564}{16} = 160{,}25 \text{ витков}$$

Принимаем при укладке витков по 160 в 12 слоях и 161 в 4–х.
10. 10. Проведем расчет высоты (осевого размера) обмотки ВН:

$$l_{\text{ВН}} = d'_{\text{ВН}} \times a'_{\text{ВН}} \times \left(w_{1\text{С(ВН)}} + 1\right) \times k_{\text{Н}} = 1{,}91 \times 1 \times (161 + 1) \times 1{,}03 = 317 \text{ мм.}$$

10. 11. Проверим разместимость обмотки ВН по оси в окне магнитопровода:

$$l_{\text{ВН}} \leq lc - 2 \times l_{02} = 360 - 2 \times 20 = 320 \text{ мм.}$$

т. к. 317 *мм*. < 320 *мм*. – по высоте стержня обмотка в окне магнитопровода разместима.
10. 12. Определим максимальное напряжение между витками в двух соседних слоях обмотки ВН:

$$Um = E_{1\text{В}} \times 2 \times w_{1\text{С(ВН)}} = 4{,}44 \times f \times Bc \times \Pi_{\text{С}} \times 2 \times w_{1\text{С(ВН)}} =$$
$$= 4{,}44 \times 50 \times 1{,}63 \times 0{,}0065 \times 2 \times 161 = 757{,}4 \text{ в}$$

10. 13. Найдем число слоев кабельной бумаги К–120 для межслойной (продольной) изоляции обмотки ВН и ее толщину. По табл. 6. 5 при *Um* до 1000 *в* число слоев n_δ кабельной бумаги К–120 (с толщиной каждого листа $\delta_{К-120}$ = 0,12 *мм*.) должно быть два, отсюда толщина межслойной изоляции:

$$\delta_{ИЗ(ВН)} = n_\delta \times \delta_К - 120 = 2 \times 0{,}12 = 0{,}24 \text{ мм.}$$

10. 14. Определим радиальный размер обмотки ВН. Каждый слой обмотки ВН выполняем проводом марки АПБ диаметром $d'_{ВН}$ = 1,9 *мм*., витки которой укладываем по высоте рядом друг с другом. После намотки слоя в 160 (161) витков, на него накладывается изоляция из двух листов кабельной бумаги. Так выполняем все 16 слоев, при этом, учитывая что число слоев обмотки ВН большое (равно 16), для улучшения охлаждения предусмотрим дополнительный охлаждающий канал – $n'_{К(ВН)}$ = 1, толщиной $a_К$ = 4 *мм*. Его выполним с помощью 6 реек длиной 360 *мм*. и толщиной 4,0 *мм*., которые разложим по окружности 6–го слоя обмотки ВН:

$$a_2 = d'_{ВН} \times n_{ВН} + \delta_{ИЗ(ВН)} \times \left(n_{ВН} - 1 - n'_{К(ВН)}\right) + a_К \times n'_{К(ВН)} =$$
$$= 1{,}8 \times 16 + 0{,}24 \times (16 - 1 - 1) + 4 \times 1 = 36{,}16 \text{ мм.}$$

10. 14. Рассчитаем внутренний диаметр цилиндра обмотки ВН. По табл. 6. 2 находится главное изоляционное расстояние между обмотками НН и ВН – a_{12}. Для трансформатора ТМ 40/10–0,4 – a_{12} = 9 *мм*., тогда:

$$D'_{ВН} = D''_{НН} + 2 \times a_{12} = 152 + 2 \times 9 = 170 \text{ мм.}$$

10. 15. Рассчитаем наружный диаметр цилиндра обмотки ВН:

$$D''_{ВН} = D'_{НН} + 2 \times a_2 = 170 + 2 \times 36{,}16 = 242{,}3 \text{ мм.}$$

10. 16. Проверка разместимости обмоток в окне магнитопровода трансформатора. По табл. 6. 2 изоляционное расстояние между обмотками ВН–ВН двух соседних фаз a_{22} = 8 *мм*. Тогда:

$$D''_{ВН} \leq C - a_{22} = 250 - 8 = 242 \text{ мм.}$$

т. к. 242,3 практически равны 242 *мм*. – обмотки разместимы в окне магнитопровода трансформатора с достаточной электрической прочностью. При необходимости для повышения последней в ремонтной практике между обмотками ВН–ВН соседних фаз устанавливаются дополнительные экраны из материалов с повышенной пробивной напряженностью.

Приложение 6–1.

Номинальные размеры и сечения медного и алюминиевого обмоточного провода марок ПБ и АПБ (размеры *a* и *b* – в *мм.*, сечения – в *мм*^{2}). Медный провод марки ПБ – все размеры таблицы, за исключением проводов с размером *b* 17 и 18 *мм*. Алюминиевый провод марки АПБ – все размеры таблицы вправо и вверх от жирной черты.

a \ *b*	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90	2,00	2,12	2,24	2,36	2,50	2,65	2,80	3,00
3,75	5,04	–	5,79	–	6,39	–	7,14	–	8,04	–	8,83	–	–	–
4,00	5,39	5,79	6,19	6,44	6,84	7,24	7,64	8,12	8,60	8,89	9,45	10,1	10,7	–
4,25	5,74	–	6,59	–	7,29	–	8,14	–	9,16	–	10,1	–	11,4	–
4,50	6,09	6,54	6,99	7,29	7,74	8,19	8,64	9,18	9,72	10,1	10,7	11,4	12,1	13,0
4,75	6,44	–	7,39	–	8,19	–	9,14	–	10,3	–	11,3	–	12,8	–
5,00	6,79	7,29	7,79	8,14	8,64	9,14	9,64	10,2	10,8	11,3	12,0	12,7	13,5	11,5
5,30	7,21	–	8,27	–	9,18	–	10,2	–	11,5	–	12,7	–	14,3	–
5,60	7,63	8,19	8,75	9,16	9,72	10,3	10,8	11,5	12,2	12,7	13,5	14,3	15,1	16,3
6,00	8,19	–	9,39	–	10,4	–	11,6	–	13,1	–	14,5	–	16,3	–
6,30	8,61	9,24	9,87	10,4	11,0	11,6	12,2	13,0	13,8	14,3	15,2	16,2	17,1	18,4
6,70	9,17	–	10,5	–	11,7	–	13,0	–	14,7	–	16,2	–	18,2	–
7,10	9,73	10,4	11,2	11,7	12,4	13,1	13,8	14,7	15,5	16,2	17,2	18,3	19,3	20,8
7,50	10,3	–	11,8	–	13,1	–	14,6	–	16,4	–	18,2	–	20,5	–
8,00	11,0	11,8	12,6	13,2	14,0	14,8	15,6	16,6	17,6	18,3	19,5	20,7	21,9	23,5
8,50	11,7	–	13,4	–	14,9	–	16,6	–	18,7	–	20,7	–	23,3	–
9,00	12,4	13,3	14,2	14,9	15,8	16,7	17,6	18,7	19,8	20,7	22,0	23,3	24,7	26,5
9,50	13,1	–	15,0	–	16,7	–	18,6	–	20,9	–	23,2	–	26,1	–
10,00	13,8	14,8	15,8	16,6	17,6	18,6	19,6	20,8	22,0	23,1	24,5	26,0	27,5	29,5
10,60	14,6	–	16,8	–	18,7	–	20,8	–	23,4	–	26,0	–	29,1	–
11,20	15,5	16,6	17,7	18,7	19,8	20,9	22,0	23,4	24,7	25,9	27,5	29,1	30,8	33,1
11,80	–	–	18,7	–	20,9	–	23,2	–	26,1	–	29,0	–	32,5	–
12,50	–	18,5	19,8	20,9	22,1	23,4	24,6	26,1	27,6	29,0	30,7	32,6	34,5	37,0
	–	–	–	–										
13,20	–	–	–	–	23,4	–	26,0	–	29,2	–	32,5	–	36,4	–
14,00	–	–	–	–	24,8	26,2	27,6	29,3	31,0	32,5	34,5	36,6	38,7	41,5
15,00	–	–	–	–	–		29,6	–	33,2	–	37,0	–	41,5	–
16,00	–	–	–	–	–		31,6	33,6	35,5	37,2	39,5	41,9	44,3	47,5
17,00	–	–	–	–	–		–	–	–	–	–	–	47,2	–
18,00	–	–	–	–	–		–	–	–	–	–	–	–	53,1

окончание таблицы 6–1.

a \ *b*	3,15	3,35	3,55	3,75	4,00	4,25	4,50	4,75	5,00	5,30	5,60
3,75	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
4,00	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
4,25	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
4,50	13,6	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
4,75	14,4	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
5,00	15,2	16,2	17,2	–	–	–	–	–	–	–	–
5,30	16,2	–	18,3	–	–	–	–	–	–	–	–
5,60	17,1	18,2	19,3	20,1	21,5	–	–	–	–	–	–
6,00	18,4	–	20,8	–	23,1	–	–	–	–	–	–
6,30	19,3	20,6	21,8	22,8	24,3	25,9	27,5	–	–	–	–
6,70	20,6	–	23,2	–	25,9	–	29,3	–	–	–	–
7,10	21,8	23,2	24,7	25,8	27,5	29,3	31,1	32,9	34,6	–	–
7,50	23,1	–	26,1	–	29,1	–	32,9	–	36,6	–	–
8,00	24,7	26,3	27,9	29,1	31,1	33,1	35,1	37,1	39,2	41,5	43,9
8,50	26,2	–	29,6	–	33,1	–	37,4	–	41,6	–	46,7
9,00	27,8	29,6	31,4	32,9	35,1	37,4	39,6	41,9	44,1	46,8	49,5
9,50	29,4	–	33,2	–	37,1	–	41,9	–	46,6	–	52,1
10,00	31,0	33,0	35,0	36,6	39,1	41,6	44,1	46,6	49,1	52,1	55,1
10,60	32,8	–	37,1	–	41,5	–	46,8	–	52,1	–	58,5
11,20	34,7	37,0	39,2	41,4	43,9	46,7	49,5	52,3	55,1	58,5	61,9
11,80	36,6	–	41,3	–	46,3	–	52,2	–	58,1	–	65,2
12,50	38,8	41,3	43,8	46,0	49,1	52,3	55,4	58,5	61,6	65,4	69,1
13,20	41,0	–	46,3	–	51,9	–	58,5	–	65,1	–	73,1
14,00	43,6	46,4	49,2	52,0	55,1	58,6	62,1	65,6	69,1	73,3	77,5
15,00	46,7	–	52,7	–	59,1	–	66,6	–	74,1	–	83,1
16,00	49,9	53,1	56,3	59,1	63,1	67,1	71,1	75,1	79,1	83,9	88,7
17,00	53,2	–	59,4	–	67,1	–	75,6	–	84,1	–	94,3
18,00	55,8	59,4	63,0	66,6	71,1	75,6	80,1	84,6	89,1	94,5	99,9

Примечание. 1. Провод марок ПБ и АПБ выпускается с толщиной изоляции на две стороны 2δ = 0,45 (0,50); 0,55 (0,62); 0,72 (0,82); 0,96 (1,06); 1,20 (1,35); 1,35 (1,50); 1,68 (1,83); и 1,92 (2,07) *мм*.

2. Медный провод марки ПБУ выпускается с размерами проволоки по стороне *a* от 1,8 до 5,6 *мм*. и по стороне *b* от 6,7 до 18 *мм*. с изоляцией толщиной 2δ = 1,35 (1,45); 2,00 (2,20); 2,48 (2,63); 2,96 (3,16); 3,60 (3,80); 4,08 (4,28) и 4,40 (4,65) *мм*.

Приложение 6–2.

Номинальные размеры сечения и изоляции круглого медного и алюминиевого провода марок ПБ и АПБ с толщиной изоляции на две стороны 2δ = 0,30 (0,40) *мм*.

диаметр, *мм*.	сечение, *мм*^{2}	диаметр, *мм*.	сечение, *мм*^{2}	диаметр, *мм*.	сечение, *мм*^{2}
марка ПБ, медь		2,00	3,14	4,00	
		2,12	3,53	4,10	
1,18	1,094	2,24	3,94	4,25	
1,25	1,23	2,36	4,375	4,50	
марка ПБ, медь				4,75	
марка АПБ, алюминий		2,50	4,91	5,0	
		2,65	5,515	5,20	
1,32	1,37	2,80	6,16	марка АПБ, алюминий	
1,40	1,51	3,00	7,07		
1,50	1,77	3,15	7,795		
1,60	2,015	3,35	8,81	5,30	22,06
1,70	2,27				
1,80	2,545	3,55	9,895	6,00	28,26
		3,75	11,05	8,00	50,24
1,90	2,805				

Примечание. 1. Провод марок ПБ и АПБ всех диаметров выпускается с изоляцией на две стороны толщиной 2δ = 0,30 (0,40); 0,72 (0,82); 0,96 (1,06) и 1,20 (1,35) *мм*. Провод диаметром от 2,24 *мм*. и выше – также с изоляцией 1,68 (1,83) и 1,92 (2,07), провод диаметром от3,75 *мм*. и выше – также с изоляцией 2,88 (3,08); 4,08 (4,33) и 5,76 (6,11) *мм*.
2. Провод марки ПСД и ПСДК выпускается в пределах диаметров от 1,18 до 5,0 *мм*. и провод марок АПСД и АПСДК – от 1,32 до 5,0 *мм*.
3. Толщина изоляции провода марок ПСД, ПСДК, АПСД и АПСДК при диаметрах до 2,12 мм 2δ = 0,29 *мм*. (в расчете принимать 0,30 *мм*.), при диаметрах от 2,24 до 5,0; 2δ = 0,35 + 0,38 *мм*. (в расчете принимать 0,40 *мм*.)

Содержание